

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2010

Vojtěch Kriebel

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh a nastavení elektrických ochran v průmyslovém podniku
Project and Adjustment of Industrial Enterprise Protections

2010

Vojtěch Kriebel

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Kriebel**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh a nastavení elektrických ochranných zařízení v průmyslovém podniku**
Project and Adjustment of Industrial Enterprise Protections

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor jističů a výpočet zkratových proudů
2. Zhodnocení stávajícího stavu ochranných rozvodů průmyslového podniku
3. Návrh a popis ochranných zařízení navržených pro ochranný rozvod
4. Výpočet zkratových poměrů pro nastavení ochranných zařízení
5. Nastavení ochranných zařízení vn a transformátoru na rozvodně

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Janíček, F. a kol.: Digitální ochrany v elektrizační soustavě. STU Bratislava, 2004.
2. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku. SNTL, Praha 1991.
3. Haluzík, E.: Ochrany a automatiky v elektrických sítích. Skriptum VUT Brno, 1985.
4. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
5. ČSN 33 3051. Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení. Listopad 1992.
6. Firemní literatura a katalogy, technická dokumentace rozvodny průmyslového podniku.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

*„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

Datum odevzdání práce:

V Ostravě,

.....
vlastnoruční podpis

Poděkování

*Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucím své diplomové práce
Doc. Dr. Ing. Zdenku Medvecovi a Ing. Markovi Tinkovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad,
podkladů a nasměrování mého úsilí do problematiky návrhu a nastavení elektrických ochran.*

*Dále bych chtěl poděkovat firmě „DOHNÁLEK – ochrany pro energetiku“ za zaslání
katalogových listů.*

Abstrakt

Moderní elektrické ochrany jsou složitá a drahá zařízení, sloužící k zajištění spolehlivého chodu elektrizační soustavy a elektrických zařízení. Publikace je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou.

Úvod teoretické části je věnován rozboru elektrických ochranných členů elektrických ochranných zařízení, definováním základních členů elektrických ochranných zařízení a jejich rozdělením. Další část je pak věnovaná základním pojmem a vztahům z oblasti teorie zkratových proudů.

Praktická část Diplomové práce pak obsahuje popis a zhodnocení stávajícího stavu ochrany ve skutečném průmyslovém podniku, návrh nových ochranných zařízení pro rozvodnu, výpočet zkratových poměrů na rozvodnách R4, R13, R14 a návrh na nastavení ochranných vývodů vysokého napětí a transformátorů na rozvodně R14. Kontrola správnosti řešení je rovněž součástí Diplomové práce.

Klíčová slova

Elektrická ochrana, impedance, průmyslový podnik, zkratový proud.

Abstract

Modern industrial enterprise protections are complicated and expensive equipment to secure reliability operation of power systems and electrical equipments. The publication is divided into two parts - theoretical and practical.

Introduction of the theoretical part is devoted to analysis of electrical protections, define basic parts of electrical protection and electrical equipment. Another section is devoted to basic conception and formulas from the theory of short-circuit currents.

Practical part includes a description and evaluation of the technical state of protection in real industrial company, projection of the new electric protections, the calculation of short-circuit conditions at the electrical substations R4, R13, R14, calculations for the settings of new electrical protections for cables and transformers at R14. Dissertation also includes a control calculation.

Keywords

Industrial enterprise protection, impedance, industrial concern, short-circuit current.

Seznam zkratk a symbolů

$ A $	absolutní hodnota komplexního čísla
\mathbf{A}	matice
A_{\max}	maximální hodnota
A_{\min}	minimální hodnota
A_n	jmenovitá hodnota
I	proud [A]
I_k''	počáteční souměrný rázový zkratový proud [A]
I_r	rozběhový proud ochrany
I_{rp}	proud na primární straně jistícího transformátoru [A]
I_{rs}	proud na sekundární straně jistícího transformátoru [A]
I_{th}	ekvivalentní oteplovací proud [A]
R	činný odpor [Ω]
S	zdánlivý výkon [VA]
U	napětí [V]
X	reaktance [Ω]
Z	impedance [Ω]
a	skalár
\mathbf{a}	fázor (komplexní veličina), vektor
i_p	nárazový zkratový proud [A]
j	imaginární jednotka komplexního čísla
l	délka vedení [m]
p_i	převod jistícího transformátoru proudu
p_u	převod jistícího transformátoru napětí

Obsah:

1. Úvod	- 8 -
2. Teoretický rozbor ochran a jištění	- 9 -
2.1. Definice základních pojmů	- 9 -
2.2. Základní členy elektrických ochran	- 10 -
2.3. Požadavky na elektrické ochrany	- 13 -
2.4. Rozdělení elektrických ochran	- 14 -
2.4.1 Nadproudové ochrany	- 16 -
2.4.2 Distanční ochrany	- 18 -
2.4.3 Rozdílové ochrany	- 20 -
3. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů	- 21 -
3.1. Základní pojmy	- 21 -
3.2. Předpoklady výpočtu	- 25 -
3.3. Výpočet zkratových poměrů ve fyzikálních jednotkách	- 26 -
3.3.1 Zkratové impedance jednotlivých zařízení	- 26 -
3.3.2 Počáteční souměrné rázové zkratové proudy	- 29 -
3.3.3 Postup výpočtu zkratových poměrů	- 30 -
4. Zhodnocení stávajícího stavu chránění rozvodny průmyslového podniku	- 30 -
5. Návrh a popis ochran navržených pro chránění rozvodny	- 33 -
6. Výpočet zkratových poměrů	- 35 -
6.1. Zkrat na rozvodně R4, R13 a R14	- 35 -
6.2. Průchozí zkratový proud	- 37 -
7. Nastavení ochran vývodů a přívodů vn	- 40 -
8. Nastavení ochran transformátorů v rozvodně R14	- 43 -
9. Kontrola průřezu vedení vn na oteplení při zkratu	- 46 -
10. Závěr	- 47 -
11. Seznam použité literatury	- 50 -
12. Seznam příloh	- 51 -

1. Úvod

V Technickém týdeníku [11], v rubrice Historické události jsem se dočetl humornou zpravu: „Devátého listopadu 1965 došlo na celém východním pobřeží Spojených států amerických a Kanady k devítihodinovému výpadku elektrického proudu. Po devíti měsících se narodil velmi nadprůměrný počet dětí.“

Ve většině případů není výpadek elektrické energie pro lidskou společnost „přínosem“, ba právě naopak. Pro maloodběratele znamená nepříjemnou zkušenost – nefunguje televize, rozhlas, nelze si uvařit jídlo apod. Pro průmyslové závody však stejná nepříjemná situace zapříčiní velké finanční ztráty. Velikost těchto ztrát pak závisí na době trvání výpadku elektrické energie. Stroje stojí, dělníci nepracují, výroba je pozastavena, může dojít k zničení drahých elektrických zařízení. Je pochopitelné, že zde existuje snaha co nejlépe se podobné situaci vyhnout a dodržovat tak pravidla pro zajištění spolehlivého a bezpečného provozu elektrických zařízení.

Jedním ze způsobů, jak předcházet výpadkům elektrické energie, je správné zvolení a nastavení chránění rozvodu elektrické energie. Chránit musíme proti účinkům zkratových proudů (tepelných a dynamických), přetížení, nadpětím, podpětím, zemním spojením, nesouměrnosti proudů, změnám kmitočtu a dalším poruchovým stavům.

Ochrana strojů a zařízení je sice nutná, ale mnohem důležitějším faktorem je zajištění bezpečnosti obsluhy a obecně všech osob, které mohou z důvodu poruchy na zařízení přijít k úrazu elektrickým proudem. Z tohoto důvodu existuje řada předpisů a nařízení, které je nutné dodržovat. Základními předpisy jsou technické normy, zákony, vyhlášky a místní pravidla. Jejich porušení může vést až k tomu nejhoršímu – úmrtí osob.

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí – teoretické a praktické. Teoretická část je věnována zejména rozboru elektrických ochranných. Čtenář se zde může dozvědět základní pojmy z této oblasti (chráněný objekt, ochrany, obsluha...), jaké prvky ochrany obsahují, co od nich požadujeme, jejich rozdělení a ukázky výpočtů nastavení pro nadproudové časově nezávislé a distanční ochrany.

Odborná studie rovněž obsahuje popis přístrojů, užívaných k jistištění elektrických zařízení, a z oblasti zkratových proudů pak základní pojmy, definice a v praxi užívané výpočty. Je zde rovněž popsána metoda souměrných složek. Text je pro lepší názornost doplněn řadou obrázků, grafů a blokových schémat.

Praktická část popisuje současný stav chránění a návrh nového chránění v průmyslovém podniku (není blíže specifikován). Dále je proveden výpočet zkratových poměrů a nastavení ochranných vývodů vysokého napětí a transformátorů na rozvodně. Výsledky jsou pak přehledně uvedeny v tabulce.

2. Teoretický rozbor ochran a jištění

Definice základních pojmů; Základní členy elektrických ochran; Požadavky na elektrické ochrany; Rozdělení elektrických ochran.

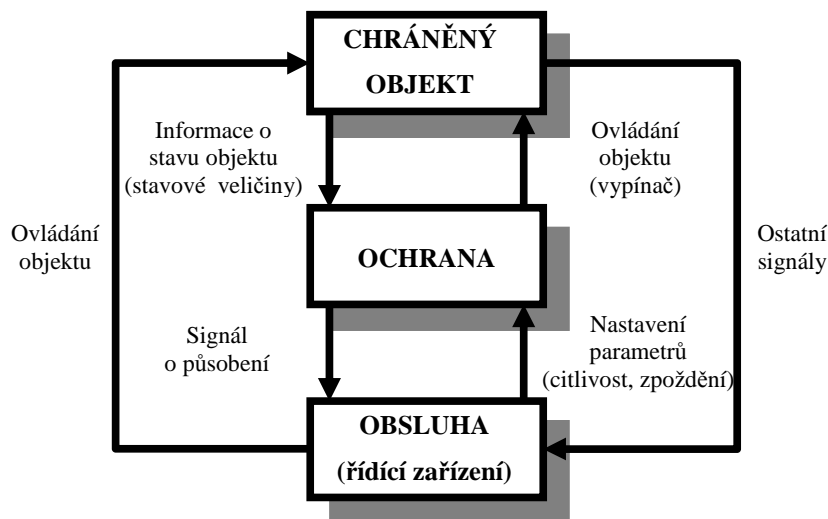
2.1. Definice základních pojmů

Úkolem ochran je nejen zajistit spolehlivý a bezpečný provoz, ale také kontrolovat činnost určité části energetického systému (vedení, přípojnice, stroje, atd.) [2]. Dojde-li na chráněném zařízení k poruše, ochrana musí tuto situaci bezpodmínečně rozpoznat a provést opatření k zamezení dalšího šíření poruchy a zabránit tak případné havárii (chráněné zařízení např. odpojí od zdroje napětí).

Aby mohla ochrana správně pracovat a chránit, musí mít přístup k informacím o aktuálním stavu chráněného zařízení. Tyto informace získává prostřednictvím jistících transformátorů proudu, jistících transformátorů napětí, respektive pomocí dalších čidel. Po zpracování a následném vyhodnocení mohou nastat tyto stavy:

- ochrana nereaguje – chráněný objekt se nachází v mezích normálního provozu
- ochrana reaguje – došlo k překročení mezních hodnot

Vzájemný vztah mezi chráněným objektem, ochranou a obsluhou je znázorněn na následujícím obrázku.



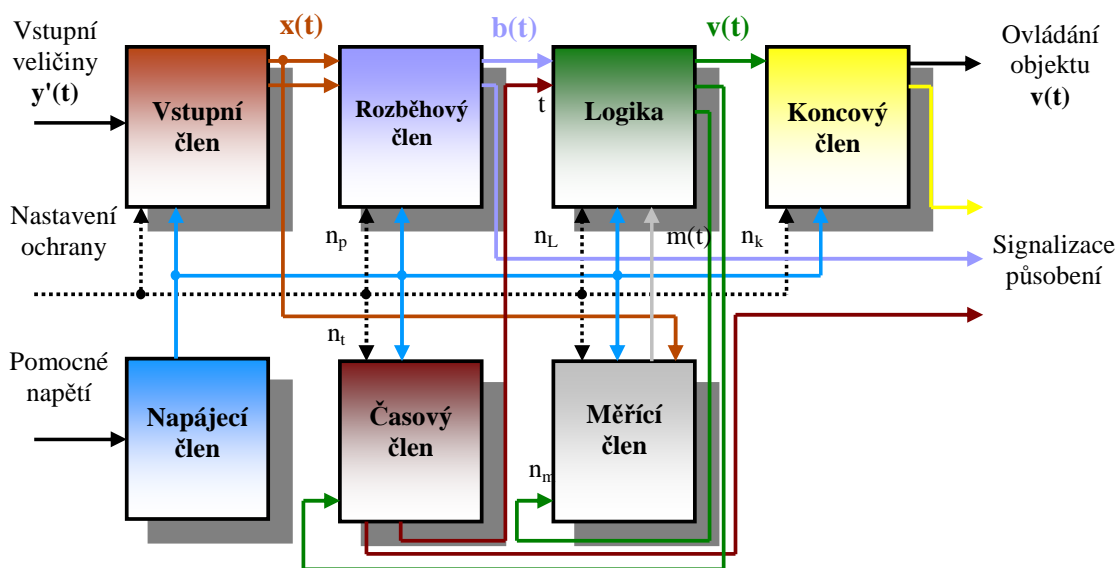
Obr. 1 Vzájemná vazba mezi chráněným objektem, ochranou a obsluhou

Chráněnými objekty mohou být nejen dílčí zařízení (např. vedení, motor, transformátor), ale také komplexní funkční celky (elektrárny, transformovny, apod.). Informaci o stavu chráněného objektu nazýváme tzv. stavovou veličinou. Jedná se o fyzikální měřitelnou veličinu, charakterizující okamžitý stav objektu. Patří zde nejen hodnoty elektrických veličin jako je například napětí, proud, kmitočet, ale také neelektrické fyzikální veličiny jako teplota, mechanická rychlost, síla a podobně.

Pod pojmem obsluha chráněného objektu rozumíme školeného pracovníka, případně řídicí počítač. Obsluze je umožněno ochranu nastavit tak, aby na případné poruchové stavy reagovala podle předem daných požadavků na chránění.

2.2. Základní členy elektrických ochran

Jak je patrné z Obr. 2 elektrické ochrany jsou složitá zařízení, složená z jednotlivých bloků nebo-li členů ochran. Není nutné, aby ochrana obsahovala všechny uvedené členy. Tato skutečnost je dána nejen konstrukcí elektrických ochran (elektromechanická vs digitální), ale také závisí na našich požadavcích ohledně zabezpečení chráněného objektu. Následuje popis jednotlivých členů.



Obr. 2 Základní členy ochran

Vstupními veličinami $y'(t)$ jsou hodnoty napětí a proudu, jenž určitým způsobem charakterizují stav chráněného objektu či zařízení. Jak již bylo výše uvedeno, jsou to hodnoty získané z jističích transformátorů a čidel. Jmenovité hodnoty $y'(t)$ pro elektrické ochrany jsou obvykle:

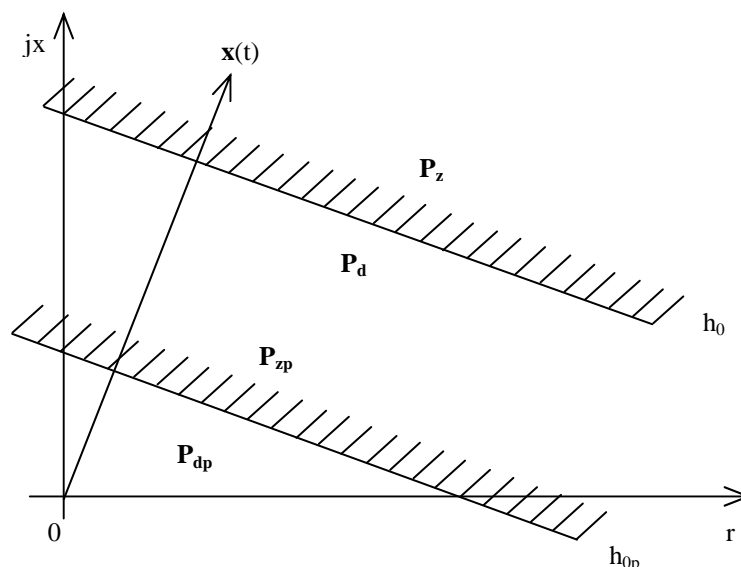
- jmenovitá hodnota napětí $U_n = 100 \text{ V}$
- jmenovitá hodnota proudu je buď $I_n = 1 \text{ A}$ nebo 5 A

Vstupní člen tyto jmenovité hodnoty dále upravuje a převádí na hladinu napětí v jednotkách voltů a proudu řádově v miliampérech. Výsledkem je pak výstupní vektor $x(t)$, jenž reprezentuje stav chráněného objektu. Úprava signálů $y'(t)$ na $x(t)$ nám umožní další členy ochran miniaturizovat a zmenšit tak výsledné zařízení. Vstupní člen také galvanicky odděluje obvody ochrany od přívodních obvodů a chrání proti elektromagnetickému rušení. Realizace u starších mechanických ochran je formou bočníků, děličů nebo transformátorů. Moderní digitální ochrany již obsahují A/D převodníky.

Při poruše na chráněném objektu uvádí ochranu do činnosti *rozběhový (popudový) člen*.

Tento prvek je součástí všech ochran a může mít stejné vlastnosti a charakteristiky jako člen měřicí. Na rozdíl od měřicího členu však musí mít vyšší citlivost, protože právě na něm závisí bezpečné a spolehlivé působení ochrany.

Měřicí člen patří mezi nejdůležitější členy, protože na něm závisí citlivost, přesnost, selektivita i další vlastnosti ochrany. Charakteristika měřicího členu je zobrazena na Obr. 3.



Obr. 3 Charakteristika rozběhového a měřicího členu:

$\mathbf{x}(t)$ – stav chráněného objektu; \mathbf{P}_d – dovolený prostor měřicího členu; \mathbf{P}_z – zakázaný prostor měřicího členu; \mathbf{P}_{dp} – dovolený prostor rozběhového členu; \mathbf{P}_{zp} – zakázaný prostor rozběhového členu; h_0 – charakteristika měřicího členu; h_{0p} – charakteristika rozběhového členu

Bude-li vektor reprezentující stav objektu $\mathbf{x}(t)$ v zakázaném pásmu \mathbf{P}_z , měřicí člen ochrany začne reagovat. Algoritmus měřicího členu lze popsat Boolovou algebrou takto:

$$m(t) = M[\mathbf{x}(t), n_m] \quad (2.1)$$

$$\text{kde } M[\mathbf{x}(t), n_m] = \begin{cases} m(t) = 0 & \text{pro } \mathbf{x}(t) \in \mathbf{P}_d \\ m(t) = 1 & \text{pro } \mathbf{x}(t) \in \mathbf{P}_z \end{cases}$$

n_m ... konstanta ovlivňující nastavení parametrů měřicího členu

Podle citlivosti K rozeznáváme několik typů měřicích členů – fázový komparátor, amplitudový, závislý, rozdílový, amplitudový komparátor a součinnový [3].

Fázový komparátor – užívá se u srovnávacích ochran. Jedná se o součinnový měřicí člen s citlivostí $K = 0$. Výstup nezáleží na velikostech vstupních veličin, ale jen na jejich fázovém úhlu.

Amplitudový měřicí člen – měří velikost vstupního proudu nebo napětí a porovnává ji s nastavenou citlivostí K . Překročí-li nastavenou citlivost, ochrana působí.

Amplitudové měřicí členy lze dále rozdělit na:

- střídavý amplitudový člen na efektivní hodnotu

$$K^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (2.2)$$

kde T ... perioda měřené veličiny $x(t)$
 K ... nastavená citlivost

- střídavý amplitudový člen na střední hodnotu

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (2.3)$$

- stejnosměrný amplitudový měřicí člen

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.4)$$

- amplitudový měřicí člen na maximální hodnotu

$$K = \max[x(t)] \quad (2.5)$$

Závislý měřicí člen – doba působení závisí na velikosti vstupní měřené veličiny

$$K = t \cdot (x - x_\infty)^n \quad (2.6)$$

kde $t = \infty$ pro $x \leq x_\infty$

$$t = \frac{K}{(x - x_\infty)} \text{ pro } x > x_\infty$$

Rozdílový měřicí člen – porovnává velikosti vstupních veličin $x_a(t)$ a $x_b(t)$ a je-li jejich rozdíl větší o nastavenou hodnotu K , pak působí

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T |x_a(t) - x_b(t)| dt \quad (2.7)$$

Amplitudový komparátor – speciální typ rozdílového členu, relé nazýváme tzv. nulovým indikátorem a citlivost měřicího členu $K = 0$

$$0 = \frac{1}{T} \int_0^T |x_a(t) - x_b(t)| dt \quad (2.8)$$

Součinový měřicí člen – užití u wattových a jalových ochran

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T x_a(t) \cdot x_b(t) dt \quad (2.9)$$

Algoritmus působení ochran je dán jejich *logickým členem*. Logika zpracovává signál z rozběhového členu $b(t)$, určuje funkci měřicího členu n_m a zároveň na základě signálu z měřicího členu $m(t)$ určuje funkci členu koncovému $v(t)$. Logika pracuje v binární soustavě a její struktura je tvořena logickými funkcemi Boolovy algebry (AND, OR, XOR, NOT). Pro realizaci logického členu se užívá nejen klasických relé, polovodičových diod, tranzistorů, integrovaných obvodů, ale také softwarového vybavení.

Čas působení elektrických ochran nastavujeme prostřednictvím *časového členu*. Tento člen lze ovlivnit nejen manuálně (obsluha), ale také signálem z logického členu ochrany. Časového zpoždění se užívá z důvodu vyloučení chybného působení ochrany a k zajištění selektivity (tzn. ochrana, jenž je od poruchy dále, reaguje později než ta, která je k místu poruchy blíže). Dále se časového zpoždění užívá v případech, kdy je možné chráněný objekt krátkodobě přetížit – využijeme tzv. akumulace energie.

Ochrany jsou z bezpečnostních a spolehlivostních důvodů nejčastěji *napájeny* z akumulátorových baterií. Digitální ochrany jsou na kvalitu napájení závislé více než klasické elektromechanické ochrany. Proto bývají akumulátorové baterie navíc ještě předřazeny stabilizátorem napětí. Přímého napájení ze střídavé sítě se moc nepoužívá, je méně spolehlivé. Existují však i ochrany, jenž pro svou funkci pomocné napětí nepotřebují.

Koncový člen je nejčastěji v provedení klasického elektromagnetického relé s výkonovými kontakty. Použití tyristorů ve funkci koncového členu se z hlediska odolnosti vůči vlivu rušení neosvědčilo.

2.3. Požadavky na elektrické ochrany

Nejdůležitějším požadavkem je *spolehlivost*. Vyžaduje se, aby ochrany za každých podmínek a v stanoveném čase plnily své funkce. Zároveň však nesmí chybně reagovat v případech, kdy se chráněný objekt nachází v normálním provozu. Spolehlivosti lze dosáhnout nejen vysokou kvalitou zpracování všech dílčích komponentů ochran, ale také například nepřetržitou automatickou kontrolou jejich obvodů.

Citlivost je definovaná jako nejmenší hodnota stavové veličiny, při které ochrany ještě spolehlivě zapůsobí. Jde o schopnost reagovat i při malém a „bezvýznamném“ narušení normálního provozu chráněného objektu. Pro zaručení bezpečnosti jsou elektrické ochrany nastaveny na nižší hodnotu stavové veličiny, než je hodnota při poruchovém stavu. Citlivost ochran lze regulovat, a proto výrobci ve svých katalogích udávají tzv. rozsah nastavení ochran.

Nebezpečné následky poruch lze omezit vhodným nastavením *rychlosti působení* elektrických ochran. Obvyklým požadavkem je, aby ochrany působily co nejrychleji. Nicméně v praxi je možné se setkat i s případy, ve kterých může být vysoká rychlost působení ochran nevýhodná (například při těžkém rozběhu motoru může dojít k chybnému vypnutí). Z tohoto důvodu lze čas působení elektrických ochran nastavit. Rychlost reakce je také závislá na konstrukci ochran. Elektromechanické jsou nejpomalejší a působí v intervalu 40 až 60 ms.

Elektronické reagují v časech 10 až 60 ms a digitální ochrany jsou nejrychlejší. Jejich rychlost je však závislá na použitém softwaru a na jejich technickém vybavení.

Ochrany jsou během provozu vystaveny například otřesům, vnějším magnetickým polím, elektrickým polím, prachu apod. Z tohoto důvodu se na ně kladou vysoké požadavky na *odolnost vůči vnějším vlivům*.

Selektivitou je označovaná schopnost vypnout pouze tu část elektrizační soustavy, jenž se nachází v poruchovém stavu. Větší poruchou nezasažená oblast musí nadále zůstat v provozu. Selektivitu můžeme zajistit například porovnáváním velikostí amplitud nebo fází veličin z různých míst, určováním směru toku výkonu při poruše, anebo časovým odstupňováním. U časového odstupňování určíme tzv. stupeň časové selektivity:

$$\Delta t = t_{v(n-1)} + t_{r(n-1)} + t_m + t_z \text{ [s]} \quad (2.10)$$

kde $t_{v(n-1)}$...doba vypnutí vypínače předchozího úseku $(n-1)$

$t_{r(n-1)}$...celková absolutní největší kladná chyba čas. členu předchozí ochrany

t_m ... celková absolutní největší záporná chyba čas. členu následující ochrany

t_z ...záložní čas, zahrnující nepřesnost předchozích činitelů; obvykle pro něho

platí že $t_z = 0,1 \text{ s}$

Provozní přesnost ochrany je poměrná chyba citlivosti. Udává se v procentech. Například pro přepětový stupeň ochrany SPAU 330 C5 platí, že provozní přesnost je rovna $\pm 3\%$ z nastavené hodnoty napětí. Obecně je přesnost ochrany definovaná výrazem:

$$\delta = \left| \frac{x - x_s}{x_r} \right| \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.11)$$

kde x ... nastavení citlivosti ochrany

x_s ...skutečná citlivost ochrany

x_r ...rozsah nastavitelnosti ochrany

2.4. Rozdělení elektrických ochrany

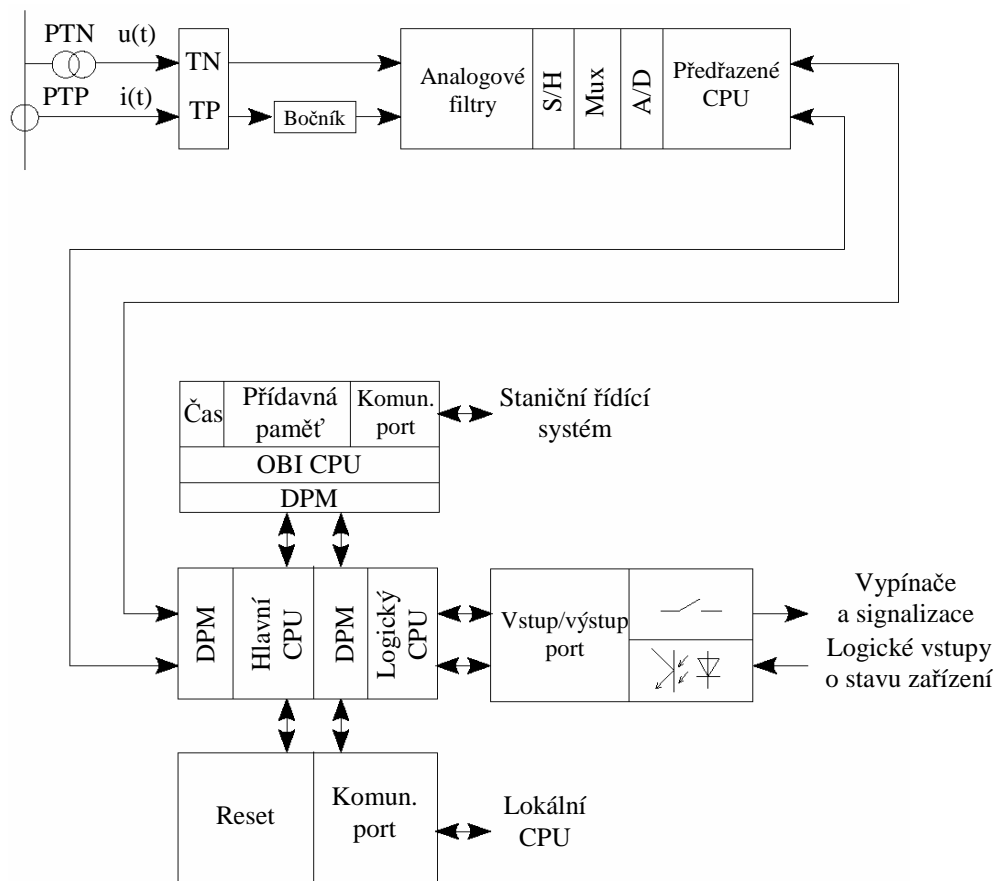
Ochrany lze rozdělit podle *chráněného objektu* na ochrany generátorů, transformátorů, vedení, kabelů, přípojníc, motorů apod. Dále můžeme provést rozdělení ochrany podle *poruchy* (zkratové, proti přetížení, přepětové...), doby působení (závislé, nezávislé, mžikové) a nebo *konstrukce ochrany*:

Nejstarším typem jsou ochrany elektromechanické [5]. Jsou tvořeny souborem klasických relé jenž mezi sebou elektricky a mechanicky spolupracují. Tento typ ochrany obsahuje pohyblivé části, což negativně ovlivňuje jejich spolehlivost, rychlost a další vlastnosti. Podle principu je lze dále rozdělit na stejnosměrné, elektrodynamické, polarizační a indukční.

Statické ochrany jsou sestaveny z polovodičových součástek (diody, tranzistory) a integrovaných obvodů, jenž nahrazují klasická relé. Nemají pohyblivé části. Signály zpracovávají analogovou cestou – spojitě. V porovnání s předchozím typem jsou rychlejší, přesnější, mají menší spotřebu, delší životnost, umožňují realizovat složitější algoritmy a taktéž požadavky na jejich údržbu jsou menší. Na druhou stranu díky polovodičovým prvkům mají

větší požadavky na chlazení a méně odolávají rušivým vlivům (např. indukovanému napětí při poruše silnoproudých zařízení).

Nejmodernějším typem jsou ochrany digitální nebo-li číslicové. Ochrany jsou spolehlivější, rychlejší a přesnější než předchozí uvedené typy. Zpracovaný signál je nespojitý, digitální. Tento typ umožňuje plnit takové funkce, které přispívají k lepšímu monitorování a řízení v elektrizační soustavě. Na následujícím obrázku je zobrazeno blokové schéma digitální ochrany.



Obr. 4 Struktura moderní digitální ochrany:

S/H – zesilovač s pamětí; Mux – multiplexor; A/D – analogově digitální převodník; CPU – mikroprocesor; DPM – paměť typu RAM; OBI – rozhraní lokální řídicí jednotky

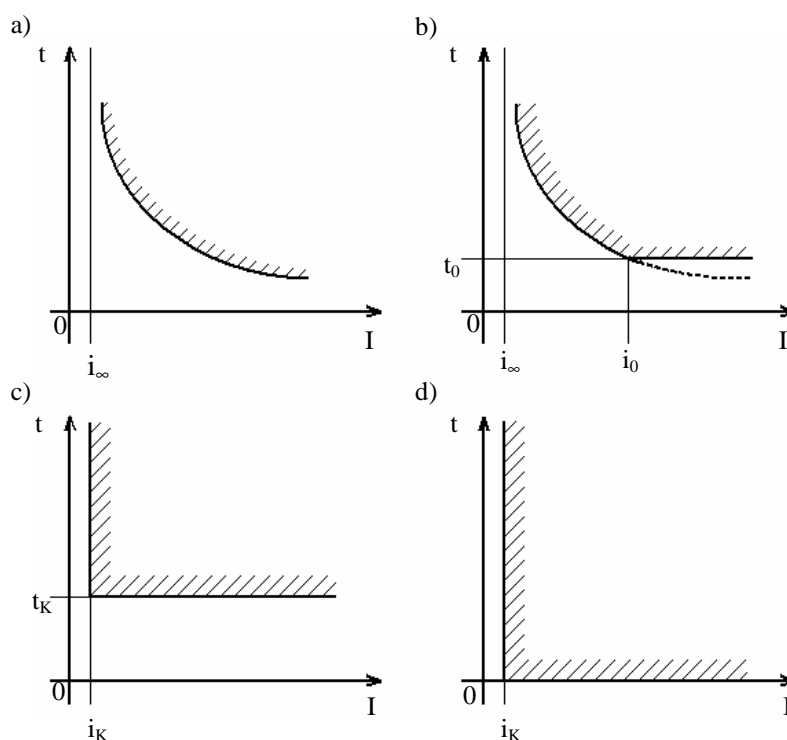
Pomocí transformátorů napětí PTN a proudu PTP jsou analogové vstupní veličiny galvanicky odděleny od vnitřních obvodů ochrany. Protože analogové obvody digitální ochrany pracují výhradně s napětím, je v proudovém obvodu přítomen převodník proudu na napětí (bočník). A/D převodník převádí analogový signál na sériový digitální signál 4 až 16-krát za jednu periodu. Celý proces je navíc kontrolován prostřednictvím předřadného mikroprocesoru.

Signál dále pokračuje přes paměti DPM do hlavního mikroprocesoru. Ten na základě naprogramovaného algoritmu vykonává ochrannou funkci ochrany. Je možné, aby hlavní CPU spolupracoval také s jinými hlavními mikroprocesory. Spojení je pak provedeno po paralelní sběrnici. Povel k vypnutí, případně povel k signalizaci vydává logický mikroprocesor.

Ochrany lze dále podle *měřené veličiny* rozdělit na ochrany proudové, napěťové, distanční, rozdílové, srovnávací, wattové, jalové, frekvenční a podobně. Následuje popis ochrany, které lze užít v průmyslu k ochraně vedení vysokého napětí.

2.4.1 Nadproudové ochrany

Užívají se pro svou jednoduchost u méně důležitých vedení velmi vysokého a vysokého napětí [4]. Při přetížení nebo zkratu dojde k nárůstu proudu do chráněného objektu. Tento proud ochrana sleduje a zareaguje, když dojde k překročení nastavené hodnoty. Nadproudové ochrany lze podle rychlosti působení rozdělit na časově nezávislé, závislé, polozávislé a mžikové. Charakteristiky těchto ochrany jsou zobrazeny na obrázku Obr.5.

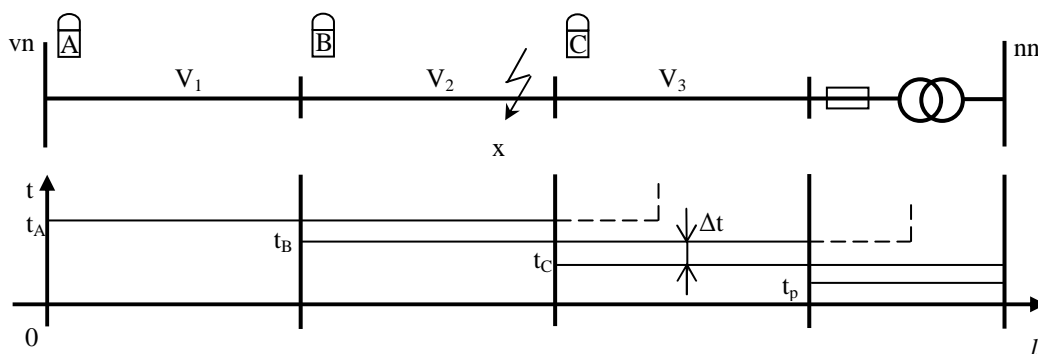


Obr. 5 Charakteristika nadproudových ochrany:

a) časově závislá b) polozávislá c) nezávislá d) mžiková

Pro paprsková vedení vysokého napětí je vhodné užít nadproudových časově nezávislých ochrany nebo nadproudových ochrany mžikových a také je vhodné je doplnit blokováním na podpětí. Okružní obousměrně napájená vedení vysokého napětí jsou obvykle chráněna nadproudovými směrovými ochranami. Nadproudové ochrany lze také užít jako záložní ochrany přípojnic.

Časově nezávislé nadproudové ochrany působí při dosažení proudu i_K v čase t_K . Tento čas je navíc pevně definován a již dále na velikosti proudu nezávisí. Na následujícím obrázku je zobrazen vypínací plán nadproudových časově nezávislých ochrany, umístěných na úseku vedení V1 až V3.



Obr. 6 Vypínací plán nadproudových časově nezávislých ochran:

A, B, C – nadproudové časově nezávislé ochrany; t_A , t_B , t_C – vypínací čas ochran; t_p – vypínací čas jištění;
 Δt – stupeň časové selektivity; x – místo poruchy

Při poruše na vedení vysokého napětí vn (viz. místo označené symbolem „x“) nejprve zapůsobí v čase t_B ochrana B. Dojde-li k selhání této ochrany, pak v čase t_A zareaguje ochrana A. Přitom platí nerovnost $t_A > t_B$. Ochrana C působit nebude. Ke zkratu na vedení totiž došlo v místě, které ochrana nechrání.

Nadproudové časově nezávislé ochrany se tedy navzájem zálohují, nicméně čas působení je závislý na místě poruchy. To sebou přináší řadu nevýhod. Vznikne-li totiž porucha na konci chráněného úseku vedení, pak jsou zkratové proudy vypínány v nejkratším čase a naopak zkraty za transformátorem, které vedou k největším zkratovým proudům jsou vypínány v čase nejdelším možném. Zásadou při návrhu těchto ochran je, aby ochrana blíže ke zdroji nebyla citlivější než ochrany vzdálenější. Nastavujeme je podle vztahů:

- Nastavení rozběhového proudu relé I_r proti přetížení

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_n}{k_p \cdot p_i} [A] \quad (2.12)$$

kde k_b ... koeficient bezpečnosti <1,1; 1,35>

$I_n [A]$...největší dovolené zatížení chráněného objektu

k_p ...přídržný poměr relé <0,85; 0,95>

p_i ...jmenovitý převod jistícího transformátoru proudu

- Nastavení rozběhového proudu relé I_r proti účinkům zkratu

$$I_r < \frac{I_{kmin}}{k_c \cdot p_i} [A] \quad (2.13)$$

kde $I_{kmin} [A]$...nejmenší zkratový proud na konci chráněného úseku, kde konec úseku je dán délkou zálohování (dvoufázový zkratový proud)

k_c ...koeficient citlivosti; $k_c = 1,2$ u digitálních ochran; $k_c = 1,5$ u elektromechanických

p_i ...jmenovitý převod jistícího transformátoru proudu

- Časové nastavení ochran

$$t_C = t_p + \Delta t [s] \quad (2.14)$$

$$t_B = t_C + \Delta t \text{ [s]} \quad (2.15)$$

$$t_A = t_B + \Delta t \text{ [s]} \quad (2.16)$$

kde t_C ... časové nastavení ochrany C
 t_B ... časové nastavení ochrany B
 t_A ... časové nastavení ochrany A
 t_p ... čas působení pojistky
 Δt ... stupeň časové selektivity, určen podle vztahu 2.10

Nadproudové ochrany s *časově závislou* charakteristikou mají tu vlastnost, že čas jejich působení je závislý na velikosti zkratového proudu. Tím lze docílit zkrácení doby vypnutí při zkratu na začátku vedení. Nejčastěji se u nadproudových časově závislých ochranných zařízení užívají jedny ze čtyř typů vypínacích charakteristik:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} \text{ [s]} \quad (2.17)$$

kde I [A] ...poruchový proud
 I_B [A]...nastavený náběhový proud
 k ...rozsah nastavení citlivosti $k = \langle 0,05; 1,0 \rangle$
 α, β ...koeficienty určené z tabulky Tab.1

Tab. 1. Strmost časově závislých charakteristik

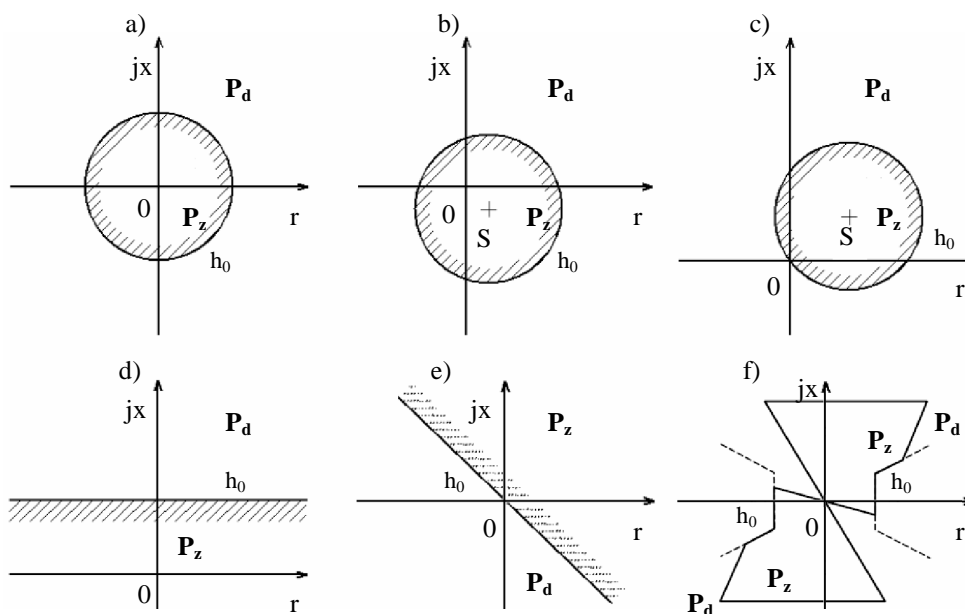
Typ závislé charakteristiky	α [-]	β [-]
Normálně závislá	0,02	0,14
Velmi závislá	1,0	13,5
Extrémně závislá	2,0	80,0
Dlouhodobě závislá	1,0	120,0

Časově *polozávislé* ochrany jsou charakteristické tím, že jejich charakteristika je prakticky složena z části závislé charakteristiky a z části nezávislé charakteristiky. Čas působení je na velikosti proudu závislý pouze do bodu daném souřadnicemi $[i_0; t_0]$. Pro proudy větší než je i_0 pak ochrana vypíná v konstantním čase t_0 .

Mžikové ochrany působí tehdy, překročí-li se nastavený proud i_K . Časové zpoždění prakticky neexistuje a je dáno pouze vlastním časem ochrany.

2.4.2 Distanční ochrany

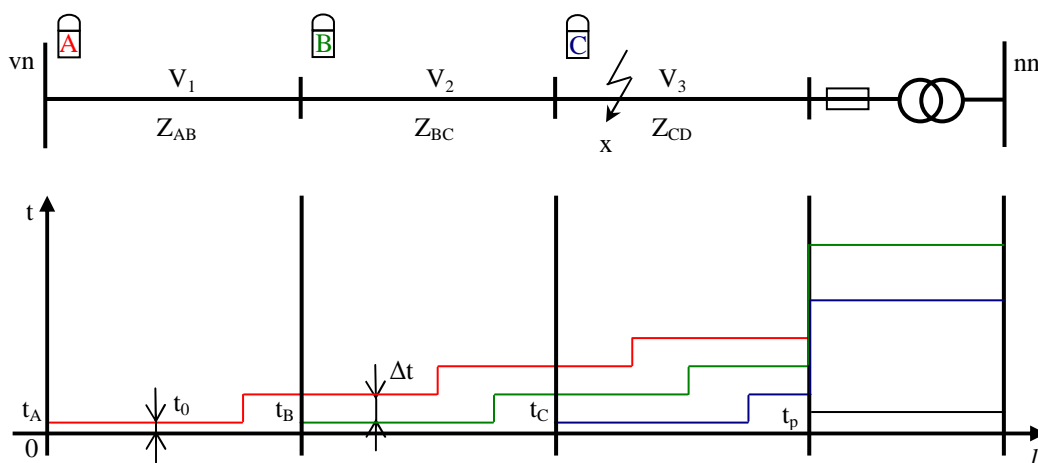
Patří mezi stupňovité ochrany. Lze je podobně jako nadproudové ochrany snadno vzájemně zálohovat. Vyhodnocují impedanci ze změřeného napětí a proudu. Působí, bude-li změřená impedance menší než nastavená. Užívají se zejména k ochraně všech vedení velmi vysokého napětí. Dále pak u důležitých kmenových, paralelních a okružních vedeních vysokého napětí. Typické charakteristiky měřících členů distančních ochranných zařízení jsou zobrazeny na Obr. 7.



Obr. 7 Charakteristiky měřících členů distančních ochran:

- a) impedanční s kruhovou char. ve středové poloze; b) offset mho; c) mho; d) reaktanční; e) směrová
f) digitální ochrany; P_d – dovolený prostor měřícího členu; P_z – zakázaný prostor měřícího členu;
 h_0 – charakteristika měřícího členu

Vypínacímu plánu distančních ochran odpovídá Obr. 8. Vznikne-li například na úseku vedení V3 porucha, pak podle vypínacího plánu nabíhají ochrany v následujícím pořadí: C, B, A. Poruchu vypne v čase t_0 ochrana C. Pokud selže, zastupuje ji v čase delším o Δt ochrana B. Selže-li i tato, pak působí ochrana A. Distanční ochrany se tedy navzájem zálohují. Porucha je vypínána v každém chráněném úseku stejně a časy působení se směrem ke zdroji neprodlužují.



Obr. 8 Vypínací plán distančních ochran:

- A, B, C – distanční ochrany; t_A , t_B , t_C – vypínací čas ochran; t_p – vypínací čas jištění; t_0 – vlastní čas působení ochran; Δt – stupeň časové selektivity; x – místo poruchy

Na distančních ochranách lze nastavit několik impedančních stupňů, jenž jsou navzájem časově posunuty o Δt [9]. Výpočet impedancí se provede následovně:

- Nastavení impedance prvního stupně

$$Z_1 = k \cdot Z_{AB} [\Omega] \quad (2.18)$$

kde k ... koeficient bezpečnosti $<0,8; 0,9>$

$Z_{AB} [\Omega]$...impedance na prvním úseku vedení

- Nastavení impedance druhého stupně

$$Z_2 = k \cdot (Z_{AB} + k \cdot Z_{BC}) [\Omega] \quad (2.19)$$

kde $Z_{BC} [\Omega]$...impedance na druhém úseku vedení

- Nastavení impedance třetího stupně

$$Z_3 = k \cdot [Z_{AB} + k \cdot (Z_{BC} + k \cdot Z_{CD})] [\Omega] \quad (2.20)$$

kde $Z_{CD} [\Omega]$...impedance na třetím úseku vedení

- Nastavení impedance čtvrtého stupně je dáno citlivostí popudového členu ochrany

Protože jsou distanční ochrany připojeny k chráněnému objektu prostřednictvím jistících transformátorů napětí a proudu, je nutné provést přepočty impedancí jednotlivých stupňů na sekundární vinutí transformátorů:

$$Z' = \frac{P_i}{P_u} \cdot Z_x \quad (2.21)$$

kde Z' ...impedance nastavená na distanční ochraně

Z_x ... impedance vypočtená dle vztahů 2.18 až 2.20

P_i ... převod jistícího transformátoru proudu

P_u ... převod jistícího transformátoru napětí

2.4.3 Rozdílové ochrany

Rozdílové ochrany lze užít k chránění krátkých paralelních vedení vysokého napětí, nebo k ochraně transformátorů [4]. Princip spočívá v měření a porovnávání proudů na obou koncích chráněného objektu. V normálním stavu je rozdílový proud získaný součtem všech porovnávaných proudů na vstupu a výstupu chráněného objektu nulový:

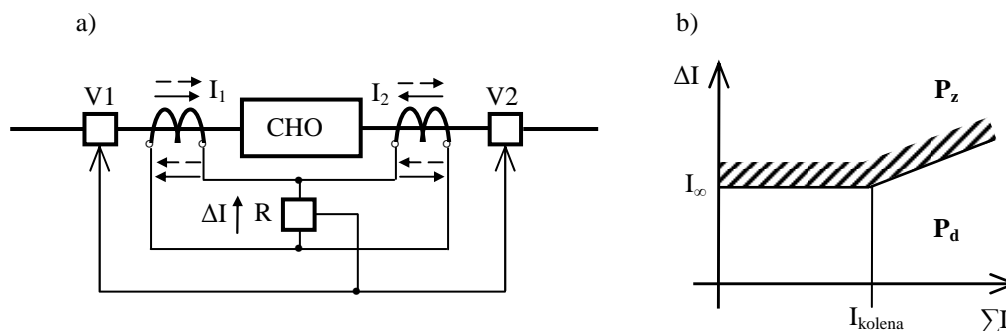
$$\Delta I = \left| \sum_{j=1}^k I_j \right| = 0 \quad (2.22)$$

kde $\Delta I [A]$...rozdílový proud

$I_j [A]$...j-tý proud na vstupu případně výstupu z chráněného objektu

Při poruše na chráněném objektu již rovnost $\Delta I = 0$ platit nebude. Bude-li pak rozdílový proud větší než proud nastavený, ochrana zapůsobí a na obou koncích chráněný objekt od zdroje napětí odpojí. Chrání-li rozdílová ochrana transformátor, je nutné, aby obsahovala filtr na druhou harmonickou. Důvodem je snaha zabránit chybnému působení ochrany vlivem velkého

proudového nárazu při připojení transformátoru na síť.



Obr. 9 Rozdílová ochrana:

a) podélná rozdílová ochrana; b) charakteristika ochrany

3. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů

Základní pojmy; Předpoklady výpočtu; Výpočet zkratových poměrů ve fyzikálních jednotkách.

3.1. Základní pojmy

Zkrat a jeho průběh

Zkrat je definován jako náhodné nebo úmyslné spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule [1]. Jedná se v podstatě o poruchu, kdy proudy ve větvích vzrostou a napětí v uzlech poklesne. Účinky zkratu jsou dvojí – tepelné a dynamické. Zkraty dělíme na souměrné a nesouměrné:

- Souměrný zkrat může nastat při kovovém dotyku všech tří fází navzájem. Vodiči pak protéká stejný zkratový proud. Souměrný zkrat se nejčastěji vyskytuje v kabelových sítích a vede k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu.
- Nesouměrné zkraty lze dále rozdělit na dvoufázové izolované (spojení dvou fází), dvoufázové zemní (dvě různé fáze a země) a jednofázové zkraty (jedna fáze se zemí u soustavy s uzemněným uzlem).

Jak je patrné z následujícího obrázku Obr.10, zkratový proud lze v každé fázi rozložit na dvě složky – střídavou a stejnosměrnou [10]:

$$i_k(t) = i_{AC}(t) + i_{DC}(t) [A] \quad (3.1)$$

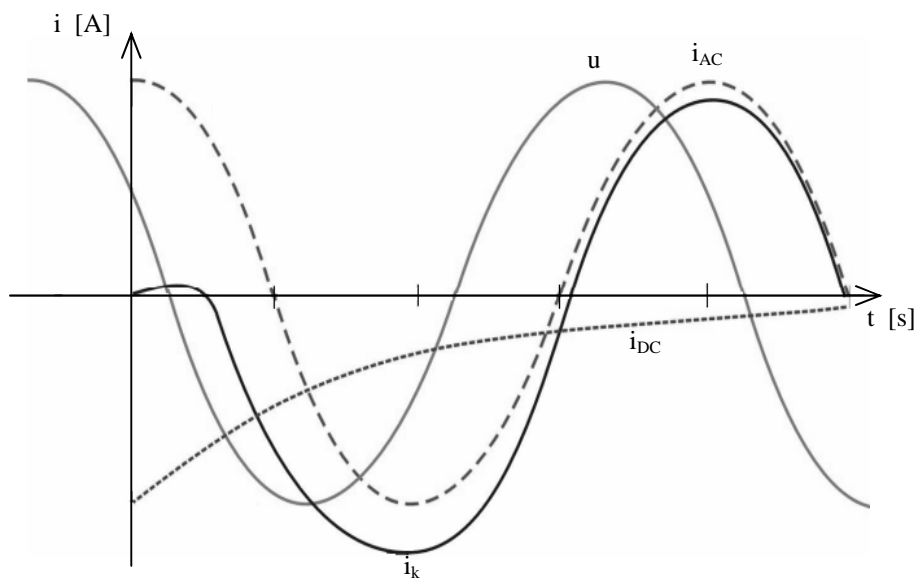
$$i_k(t) = \frac{U_{max}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] [A] \quad (3.2)$$

kde U_{max} [V]...maximální hodnota napětí
 Z_k [Ω]...impedance zkratového obvodu

- ω [rad·s⁻¹]...úhlová rychlost
 α [rad]...úhel charakterizující vznik zkratu
 φ [rad]...úhel charakterizující zkratový obvod
 τ_k [rad]...časová konstanta charakterizující zkratový obvod

Střídavá složka $i_{AC}(t)$ je charakteristická amplitudou a kmitočtem daného zdroje. Počáteční hodnota je dána okamžikem vzniku zkratu (úhlem α) a úhlem impedance zkratového obvodu (φ_k).

Stejnoseměrná složka zkratového obvodu $i_{DC}(t)$ závisí na parametrech zkratového obvodu a doznívá s časovou konstantou $\tau_k = \frac{L_k}{R}$. Stejnoseměrná složka nevznikne při $\alpha = \varphi_k$ a je maximální při $\alpha - \varphi_k = \pm \frac{\pi}{2}$ [10].



Obr. 10 Časový průběh proudu při třífázovém zkratu napájeném ideálním zdrojem napětí:

u – napětí; i_k – zkratový proud; i_{DC} – stejnosměrná složka i_k ; i_{AC} – střídavá složka i_k

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

Počáteční souměrný rázový zkratový proud je dle ČSN EN 60909-0 definován jako efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci. Vztahy pro výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu při trojfázovém, dvoufázovém a jednofázovém zkratu jsou detailně popsány a uvedeny v kapitole 3.3.2.

Nárazový zkratový proud

Nárazovému zkratovému proudu odpovídá maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu [1]. Tento proud způsobuje v postiženém elektrickém

obvodě největší silový ráz a lze ho vypočítat podle vzorců:

$$i_{p3} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3} \text{ [kA]} \quad (3.3)$$

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3} \text{ [kA]} \dots \text{platí za předpokladu } \mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} \quad (3.4)$$

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1} \text{ [kA]} \quad (3.5)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3R}{X}} [-] \quad (3.6)$$

kde $i_{p3}, i_{p2}, i_{p1} \dots$ třífázový, dvoufázový a jednofázový nárazový zkratový proud

$\kappa [-]$...součinitel nárazového zkratového proudu

$I''_{k3}, I''_{k1} \text{ [kA]}$...třífázový a jednofázový počáteční souměrný rázový zkratový proud

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

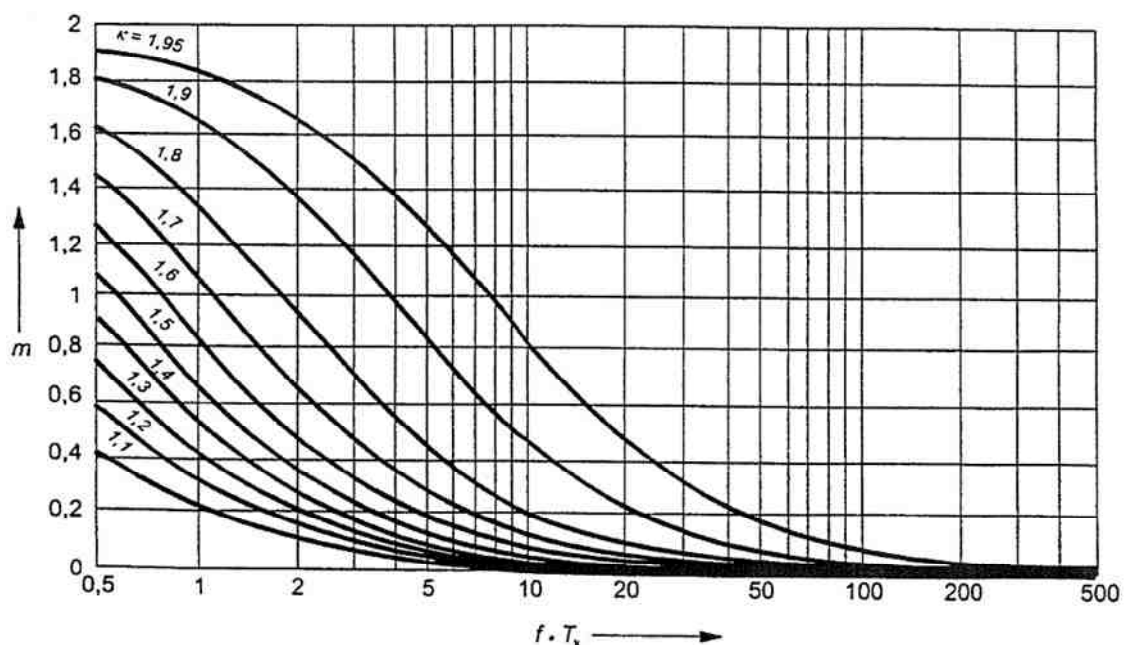
Ekvivalentní oteplovací zkratový proud má stejné tepelné účinky a stejnou dobu působení jako skutečný časově proměnný zkratový proud obsahující stejnosměrnou složku:

$$I_{th} = I''_k \cdot \sqrt{m+n} \text{ [kA]} \quad (3.7)$$

kde $m [-]$...součinitel tepelných účinků stejnosměrné složky zkratového proudu

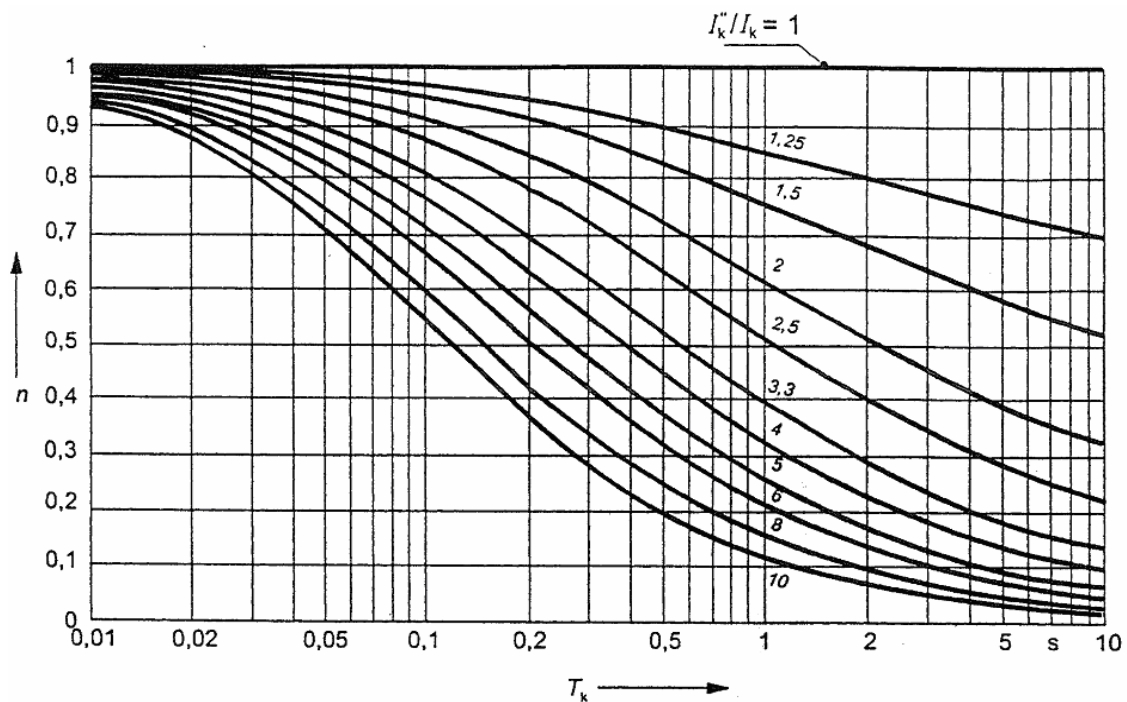
$n [-]$...součinitel tepelných účinků střídavé složky zkratového proudu určený

U distribučních sítí, tzn. elektricky vzdálených zkratů je možné uvažovat s rovností $n = 1$. Pro vzdálené zkraty s dobou trvání zkratu 0,5 s a více se může uvažovat že $m + n = 1$.



Obr. 11 Součinitel m pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu

T_k – součet dob trvání pro všechny zkratové proudy; f – síťový kmitočet



Obr. 12 Součinitel n pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu

T_k – součet dob trvání pro všechny zkratové proudy; I_k'' – počáteční souměrný rázový zkratový proud;
 I_k – ustálený zkratový proud

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud se například používá při kontrole na tepelnou odolnost vodičů při zkratu [10]. Minimální průřez vodiče je pak dán výrazem:

$$S_{\min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{K} \left[\text{mm}^2 \right] \quad (3.8)$$

kde t_k [-] ...doba trvání zkratu

K [-] ...koeficient respektující teplotu jádra kabelu před a po zkratu, viz. příloha Diplomové práce [1]

Souměrné složky

Máme-li třífázovou soustavu ve které mají zátěže připojené k jednotlivým fázím různou velikost, pak v důsledku nesouměrných proudů I_{L1} , I_{L2} a I_{L3} dojde ke vzniku různých úbytků napětí na impedancích soustavy a zároveň dojde ke vzniku nesouměrných napětí. Tyto třífázové soustavy lze pak řešit pomocí metody souměrných složek, kde každou nesouměrnou hvězdicí fázorů (proudů i napětí) nahradíme součtem tří symetrických soustav (platí pro referenční fázi L_1) [1]:

$$I_{L1} = I_{(1)} + I_{(2)} + I_{(0)} \quad [A] \quad (3.9)$$

$$I_{L2} = a^2 \cdot I_{(1)} + a \cdot I_{(2)} + I_{(0)} \quad [A] \quad (3.10)$$

$$I_{L3} = a \cdot I_{(1)} + a^2 \cdot I_{(2)} + I_{(0)} \quad [A] \quad (3.11)$$

$$\mathbf{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} [-] \quad (3.12)$$

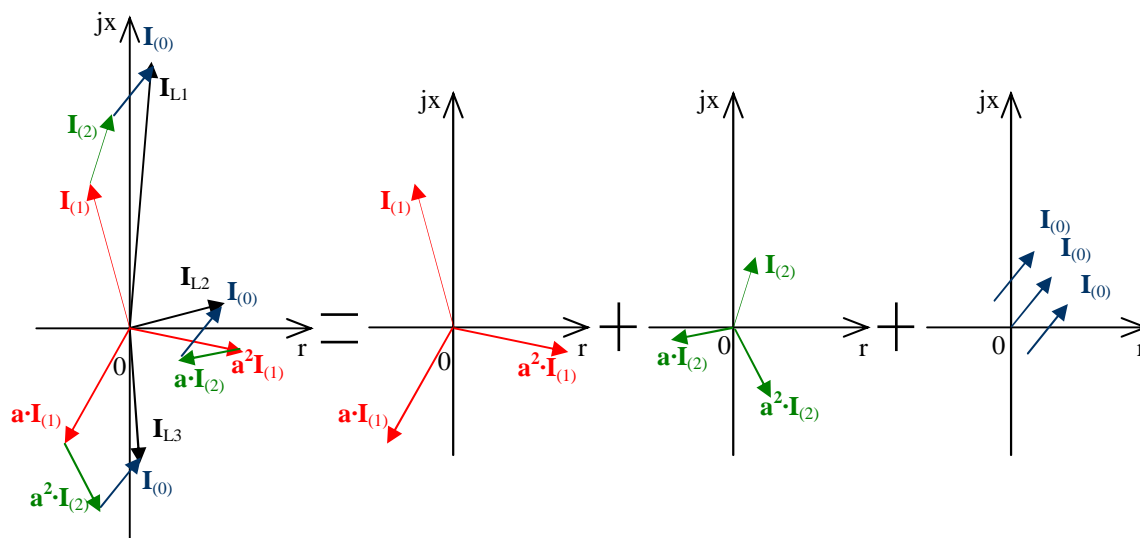
$$\mathbf{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} [-] \quad (3.13)$$

kde $\mathbf{I}_{(1)}$ [A]... proud sousledné složkové soustavy

$\mathbf{I}_{(2)}$ [A]... proud zpětné složkové soustavy

$\mathbf{I}_{(0)}$ [A]... proud netočivé složkové soustavy

\mathbf{a}, \mathbf{a}^2 [-]... vektorový operátor



Obr. 13 Rozložení třífázové nesouměrné soustavy na souslednou, zpětnou a netočivou soustavu

3.2. Předpoklady výpočtu

Výpočet zkratových proudů se provádí z důvodu nastavení ochran (minimální zkratové proudy) a za účelem dimenzování (maximální zkratové proudy). Řešení této problematiky může být v technické praxi složité a zdlouhavé. Proto zavádíme jistá zjednodušení, jenž nám výpočet nejen usnadní, ale zároveň i zajistí dostatečnou přesnost výsledku.

Například po celou dobu trvání zkratového proudu uvažujeme, že v počítané síti nedochází k žádným změnám a zároveň zkratový proud je po celou dobu trvání zkratu neměnný [1]. U transformátorů zavádíme korekční součinitel pro impedanci K_T (viz. vztahy 3.19, 3.29 až 3.31). Dále zanedbáváme všechny odpory oblouků, kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé statické zátěže. Nutno poznamenat, že v netočivé soustavě s paralelními admitancemi nadále počítáme.

Pro souměrné a nesouměrné zkraty užíváme metody souměrných složek. Počítáme-li zkratové proudy v soustavě s několika rozdílnými napěťovými hladinami, přepočítáme hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou podle vzorce:

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 [\Omega] \quad (3.14)$$

kde $Z_2 [\Omega]$...impedance přepočtena na napětíovou hladinu U_2 [kV] v místě zkratu
 $Z_1 [\Omega]$...impedance na napětíové hladině U_1 [kV]

Nyní zavedeme tzv. napětíový součinitel c , což je poměr mezi napětím ideálního zdroje přiloženého v místě zkratu v sousledné složkové soustavě a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Tab. 2. Tabulka napětíových součinitelů c

Jmenovité napětí U_n	c_{\max} ¹⁾	c_{\min}
nízké napětí 100 V – 1000 V	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
vysoké napětí > 1 kV – 35 kV	1,10	1,00
velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV	1,10	1,00

1) $c_{\max} U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav
2) Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{\max} U_n = U_m$ nebo $c_{\min} U_n = 0,9 U_m$
3) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6%, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V
4) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10%

Při výpočtu minimálních zkratových proudů uijeme napětíového součinitele c_{\min} z Tab.2. Konfiguraci soustavy volíme tak, aby v místě zkratu došlo ke vzniku minimálních zkratových proudů. Dále zanedbáme všechny motory a resistance vedení uvažujeme při maximální teplotě (doporučuje se použít maximální dovolenou provozní teplotu vodičů).

Podmínky pro výpočet maximálních zkratových proudů jsou následující. Použijeme napětíového součinitele c_{\max} z Tab.2, vybereme konfiguraci soustavy tak, aby vedla k maximálním hodnotám zkratových proudů v místě zkratu a uvažujeme minimální zkratovou impedanci síťového napáječe. Při výpočtu dále zahrneme motory a rezistenci vedení uvažujeme při teplotě 20°C.

3.3. Výpočet zkratových poměrů ve fyzikálních jednotkách

3.3.1 Zkratové impedance jednotlivých zařízení

Síťový napáječ

$$Z_{Q(1)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{c \cdot U_n^2}{S''_k} [\Omega] \quad (3.15)$$

kde $c [-]$...napětíový součinitel, viz. tabulka Tab.2

I''_{kQ} [kA] ... počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q

S''_k [MVA]...zkratový výkon soustavy

Ekvivalentní impedanci lze považovat za reaktanci (tzn. $Z_{Q(1)} = X_{Q(1)}$) v případech napáječů se jmenovitým napětím $U_n > 35$ kV napájených z venkovního vedení. V jiných případech je možné pro rezistanci uvažovat $R_Q = 0,1 \cdot X_Q$, kde $X_Q = 0,995 \cdot Z_{(1)}$.

Dvouvinuťový transformátor

$$Z_{T(1)} = \frac{u_{kr} \cdot U_{rT}^2}{100 \cdot S_{rT}} \quad [\Omega] \quad (3.16)$$

$$R_{T(1)} = \frac{u_{Rr} \cdot U_{rT}^2}{100 \cdot S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad [\Omega] \quad (3.17)$$

$$X_{T(1)} = \sqrt{Z_{T(1)}^2 - R_{T(1)}^2} \quad (\Omega) \quad (3.18)$$

kde U_{rT} [V] ...jmenovité napětí transformátoru
 I_{rT} [A] ...jmenovitý proud transformátoru
 S_{rT} [MVA] ...jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
 P_{krT} [MW] ...jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
 u_{kr} [%] ...jmenovité napětí nakrátko
 u_{Rr} [%] ...činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru

V případě velkých transformátorů je odpor tak malý, že je možné předpokládat $Z_{T(1)} = X_{T(1)}$. Odpor uvažujeme pouze při výpočtu nárazového zkratového proudu i_p nebo stejnosměrné složky i_{DC} .

Korekční součinitel K_T pro impedanci dvouvinuťových síťových transformátorů

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad [-] \quad (3.19)$$

$$Z_{TK(1)} = K_T \cdot Z_{T(1)} \quad [\Omega] \quad (3.20)$$

$$x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT}) \quad [-] \quad (3.21)$$

kde x_T [-] ...poměrná reaktance transformátoru
 c_{max} [-] ...napěťový součinitel dle Tab.2 odpovídající jmenovitému napětí sítě připojené ke straně nižšího napětí síťového transformátoru
 $Z_{TK(1)}$ [Ω] ...přepočtená hodnota sousledné impedance dvouvinuťového transformátoru

Přepočet se provádí pro síťové transformátory s přepínačem odboček při zatížení i bez zatížení. Korekční součinitelé se musí použít nejen pro výpočet sousledné, ale také pro zpětnou a netočivou soustavu. Impedance mezi uzlem a zemí se musí určit bez korekčního součinitele a zahrnuje trojnásobek netočivé soustavy. Přepočet se neprovádí pro blokové transformátory.

Trojvinuťový transformátor

$$Z_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100} + j \frac{u_{XrAB}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad [\Omega] \quad \text{...při rozpojení strany C} \quad (3.22)$$

$$Z_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100} + j \frac{u_{XrAC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad [\Omega] \quad \text{...při rozpojení strany B} \quad (3.23)$$

$$Z_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100} + j \frac{u_{XrBC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad [\Omega] \quad \text{...při rozpojení strany A} \quad (3.24)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad [V] \quad (3.25)$$

$$Z_A = \frac{1}{2} (Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC}) \quad [\Omega] \quad (3.26)$$

$$\mathbf{Z}_B = \frac{1}{2}(\mathbf{Z}_{BC} + \mathbf{Z}_{AB} - \mathbf{Z}_{AC}) \quad [\Omega] \quad (3.27)$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{2}(\mathbf{Z}_{AC} + \mathbf{Z}_{BC} - \mathbf{Z}_{AB}) \quad [\Omega] \quad (3.28)$$

kde $U_{rTA}[\text{V}]$...jmenovité napětí na straně A

$S_{rTAB}[\text{VA}]$...jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B

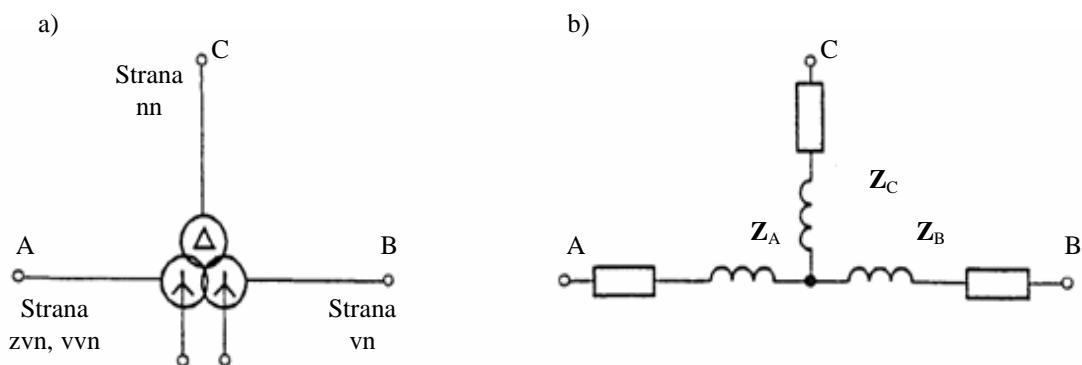
$S_{rTAC}[\text{VA}]$...jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C

$S_{rTBC}[\text{VA}]$...jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C

$u_{rTAB}, u_{xrAB}[\%]$...jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko mezi stranami A a B

$u_{rTAC}, u_{xrAC}[\%]$...jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko mezi stranami A a C

$u_{rTBC}, u_{xrBC}[\%]$...jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko mezi stranami B a C



Obr. 14 Trojvinut'ový transformátor:

a) označení zapojení vinutí; b) náhradní schéma složkové soustavy

Korekční součinitelé pro impedanci trojvinut'ových transformátorů

$$K_{TAB(1)} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad [-] \quad (3.29)$$

$$K_{TAC(1)} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad [-] \quad (3.30)$$

$$K_{TBC(1)} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad [-] \quad (3.31)$$

kde $x_{TAB}, x_{TAC}, x_{TBC} [-]$...poměrné reaktance transformátoru

$c_{\max} [-]$...napěťový součinitel dle Tab.2 odpovídající jmenovitému napětí sítě

Korekčními součiniteli se získají impedance $\mathbf{Z}_{ABK} = K_{TAB} \cdot \mathbf{Z}_{AB}$, obdobně pak i \mathbf{Z}_{ACK} a \mathbf{Z}_{BCK} . Dále se provede výpočet podle rovnic 3.26 až 3.28 a určí se \mathbf{Z}_{AK} , \mathbf{Z}_{BK} a \mathbf{Z}_{CK} . Korekční součinitelé se musí užít při výpočtu sousledné, zpětné a netočivé soustavy. Přepočet se neprovádí pro impedanci mezi uzlem a zemí.

Venkovní vedení a kabel

$$X_{(1)} = x_k \cdot l \text{ } [\Omega] \quad (3.32)$$

$$R_{(1)} = r_k \cdot l \text{ } [\Omega] \quad (3.33)$$

$$Z_{V(1)} = R_{(1)} + jX_{(1)} \text{ } [\Omega] \quad (3.34)$$

kde $x_k \text{ } [\Omega \text{km}^{-1}]$...reaktance sousledné složky vedení
 $r_k \text{ } [\Omega \text{km}^{-1}]$...rezistance sousledné složky vedení
 $l \text{ } [\text{km}]$...délka vedení

Reaktor

$$Z_{R(1)} = \frac{u_{kR} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{rR}} \text{ } [\Omega] \quad (3.35)$$

kde $u_{kR} \text{ } [\%]$... štítkový údaj impedančního napětí reaktoru
 $I_{rR} \text{ } [\text{A}]$... štítkový údaj jmenovitého proudu reaktoru
 $U_n \text{ } [\text{kV}]$...jmenovité napětí soustavy

Asynchronní motor

$$Z_{M(1)} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \text{ } [\Omega] \quad (3.36)$$

kde $U_{rM} \text{ } [\text{V}]$...jmenovité napětí motoru
 $I_{rM} \text{ } [\text{A}]$...jmenovitý proud motoru

$S_{rM} \text{ } [\text{VA}]$...jmenovitý zdánlivý příkon motoru, platí $S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\eta_{rM} \cdot \cos \varphi_{rM}}$

$\frac{I_{LR}}{I_{rM}} \text{ } [-]$...poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru

Při výpočtu zkratových proudů lze zanedbat ty motory vysokého a nízkého napětí, které s ohledem na schéma zapojení nebo funkci nejsou zároveň v provozu.

Poznámka

V případě elektrizační soustavy s několika napěťovými hladinami je nutné provést přepočty výše uvedených impedancí na napěťovou hladinu v místě zkratu podle vzorce 3.14 uvedeném v kapitole 3.2 Předpoklady výpočtu.

3.3.2 Počáteční souměrné rázové zkratové proudy

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu I''_{k3} se obecně počítá z napětí ekvivalentního napěťového zdroje $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ v místě zkratu a sousledné zkratové impedance $Z_{(1)}$:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R^2 + X^2}} \text{ } [\text{kA}] \quad (3.37)$$

V počátečním období *dvoufázového zkratu* jsou sousledné a zpětné impedance přibližně stejné. Proto lze provést následující úpravu:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3} \text{ [kA]} \quad (3.38)$$

Za předpokladu elektricky vzdáleného zkratu platí rovnost $Z_{(2)} = Z_{(1)}$ a výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu při *jednofázovém zkratu* I''_{k1} lze určit takto:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|2 \cdot Z_{(1)} + Z_{(0)}|} \text{ [kA]} \quad (3.39)$$

kde c [-] ... napěťový součinitel, viz. tabulka Tab.2

U_n [V] ... jmenovité sdružené napětí sítě v místě zkratu

$Z_{(1)}$ [Ω] ... sousledná impedance zkratového obvodu

$Z_{(2)}$ [Ω] ... zpětná impedance zkratového obvodu

$Z_{(0)}$ [Ω] ... nulová impedance zkratového obvodu

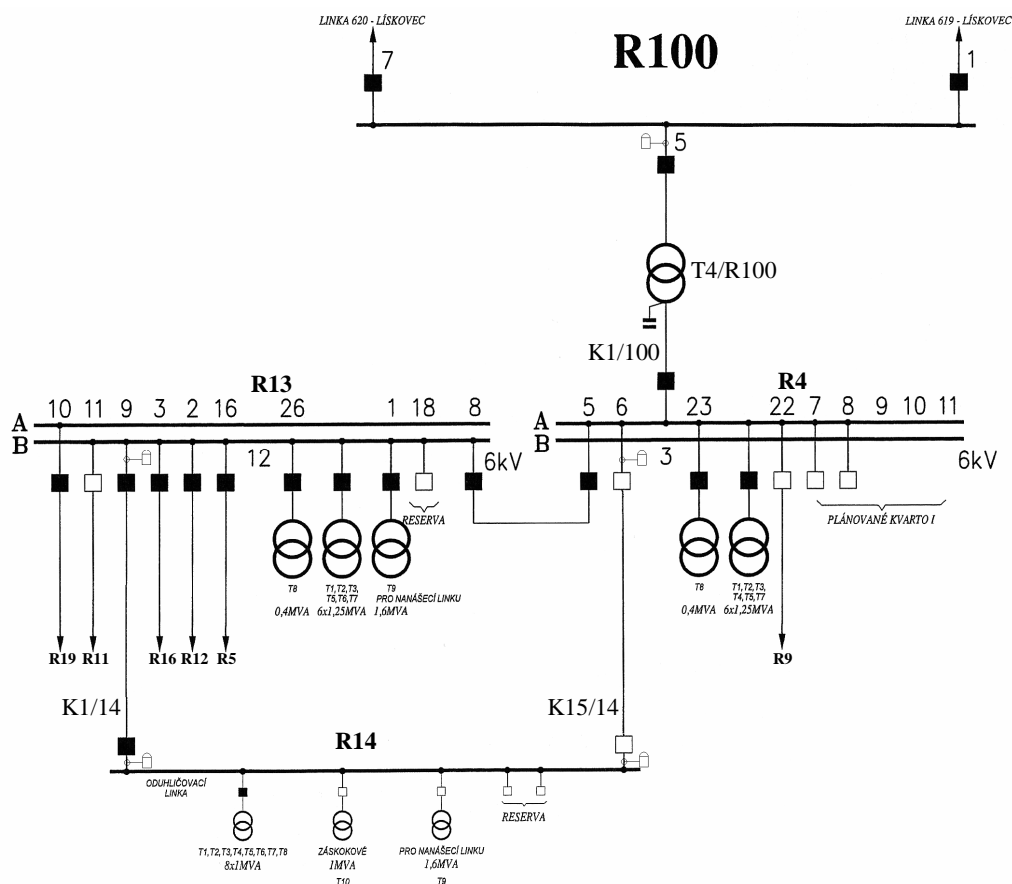
3.3.3 Postup výpočtu zkratových poměrů

- Sestavení náhradního schématu soustavy
- Stanovení zkratové impedance jednotlivých zařízení dle vztahů v kapitole 3.3.1; pro nastavení ochran použít napěťového součinitele c_{\min} , pro dimenzování nutno dosadit c_{\max} (viz. Tab.2)
- Určení výsledné impedance náhradního schématu soustavy
- Výpočet zkratových proudů: pro nastavení ochran $I''_{k2\min}$, pro dimenzování $I''_{k3\max}$

4. Zhodnocení stávajícího stavu chránění rozvodny průmyslového podniku

Průmyslový podnik je napájen z rozvodny Lískovec 110kV dvěma nezávislými linkami 619 a 620 [14]. Jmenovitá zkratová odolnost rozvodny R100 je určena jmenovitým zkratovým výkonem S_{kn} a jmenovitým zkratovým proudem I_{kn} (viz. tabulka Tab. 3.). Rozvodna je dále charakterizovaná maximálním a minimálním zkratovým výkonem $S_{k\max} = 2756\text{MVA}$ a $S_{k\min} = 975,7\text{MVA}$.

Výkon z rozvodny R100 je dále veden přes transformátor T4/R100 a kabel K1/100 na přípojnice R4 a R13, napájející jednotlivé odběry. Rozvodna R14 je napájena z R13 prostřednictvím vodičů 10-AXEKCY (2x na každou fázi). Záložní napájení je provedeno shodnou kabeláží z přípojnice R4. V běžném provozu se toto propojení provozuje v rozepnutém stavu. Popsané situaci odpovídá následující obrázek.

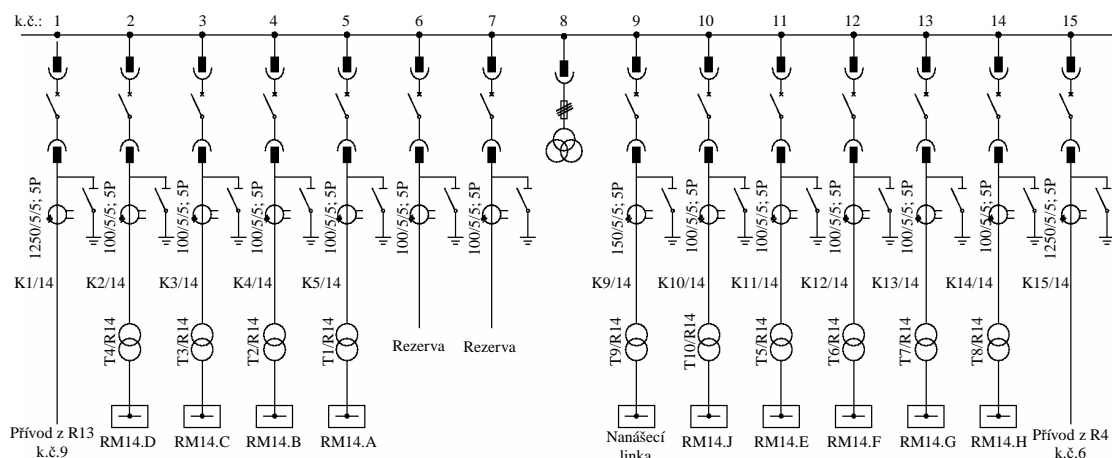


Obr. 15 Napájení průmyslového podniku

Tab. 3. Charakteristické vlastnosti vybraných objektů z Obr. 15

Označení	Zařízení	Parametry
R4	rozvodna	$S_{kn} = 400\text{MVA}$; $I_{kn} = 38,5\text{kA}$
R13	rozvodna	$S_{kn} = 400\text{MVA}$; $I_{kn} = 38,5\text{kA}$
R14	rozvodna	$S_{kn} = 350\text{MVA}$; $I_{kn} = 33,7\text{kA}$
R100	rozvodna	$S_{kn} = 3500\text{MVA}$; $I_{kn} = 18,4\text{kA}$; $S_{kmax} = 2756\text{MVA}$; $S_{kmin} = 975,7\text{MVA}$
T4/R100	transformátor	1ER 29M; 110/6,3kV; 16MVA; $u_{kr} = 10,2\%$
K1/100	kabel	8xkabel; $l = 0,33\text{km}$; $r_k = 0,129\Omega\cdot\text{km}^{-1}$; $x_k = 0,082\Omega\cdot\text{km}^{-1}$
K1/14	kabel	10-AXEKC; $2\times 3\times 1\times 500\text{mm}^2$; $l = 0,22\text{km}$; $r_k = 0,06\Omega\cdot\text{km}^{-1}$; $x_k = 0,0942\Omega\cdot\text{km}^{-1}$; $I_{dov} = 963\text{A}$
K15/14	kabel	10-AXEKC; $2\times 3\times 1\times 500\text{mm}^2$; $l = 0,22\text{km}$; $r_k = 0,06\Omega\cdot\text{km}^{-1}$; $x_k = 0,0942\Omega\cdot\text{km}^{-1}$; $I_{dov} = 963\text{A}$

Rozvodna R14 je sestavena ze vzduchem izolovaných kovově krytých rozvaděčů. Napěťová soustava je provedena v síti 3PE AC 50Hz 6kV/IT a k ochraně před nebezpečným dotykem je užito samočinného odpojení od zdroje v síti IT. Rozvodna je složena z 15 polí, kde jedno slouží pro měření (k.č. 8), dvě pro přívod elektrické energie (k.č. 1 a 15), další dvě jsou nevyzbrojené rezervy (k.č. 6 a 7) a zbývající vývodová pole jsou určená k napájení spotřeby.

3PE AC 50Hz 6kV/TT, $I_n = 1250\text{A}$, $I_{ks} = 40\text{kA}$ **Obr. 16** Jednopolové schéma rozvodny R14

Spotřebiče za rozvodnou R14 jsou napájeny z deseti transformátorů T1/R14 až T10/R14. Transformátor T9/R14 napájející nanášecí linku má následující parametry: 6/0,4kV; 1600kVA; Dy1; $u_{kr} = 6,06\%$. Zbývající transformátory jsou typově i výkonnostně shodné a jejich štítkové údaje jsou následující: 6/0,4kV; 1000kVA; Dy1; $u_{kr} = 5,4\%$.

Tab. 4. Parametry kabelů v rozvodně R14

Označení	Parametry
K1/14	10-AXEKCY; $2 \times 3 \times 1 \times 500\text{mm}^2$; $l = 0,22\text{km}$; $r_k = 0,06\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,0942\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_{dov} = 963\text{A}$
K2/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,024\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K3/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,024\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K4/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,02\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K5/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,02\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K9/14	10-AXEKCY; $3 \times 1 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,027\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,1068\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 154\text{A}$
K10/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,025\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K11/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,03\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K12/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,027\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K13/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,025\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K14/14	6-AYKCY; $3 \times 240\text{mm}^2$; $l = 0,02\text{km}$; $r_k = 0,125\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,088\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_n = 96\text{A}$
K15/14	10-AXEKCY; $2 \times 3 \times 1 \times 500\text{mm}^2$; $l = 0,22\text{km}$; $r_k = 0,06\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,0942\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_{dov} = 963\text{A}$

Nadřazená ochrana typu SPAD 346C2 na přívodní straně transformátoru T4/R100 má nastavený vypínací čas na 1,5s. Vývod č.9 z přípojnice R13 a vývod č.6 z přípojnice R4 je osazen nadproudovou časově nezávislou ochrannou AT31X (800A; 0,75s) a nadproudovou mžikovou ochrannou A32 (4000A; působí bez zpoždění okamžitě). Přívodní pole č.1 a č.15 rozvodny R14 jsou osazeny nejen nadproudovými časově nezávislými ochranami AT31X (850A; 0,6s), ale také napětovými relé V22 (4800V). Zbývající vývody rozvodny R14 mají nainstalovány pouze nezávislé ochrany AT21X (105A; 0,4s). Následuje stručný popis výše uvedených ochran:

- A32 – třífázové nadproudové mžikové relé; v časech největší „slávy“ používané

u drahých a důležitých el. zdrojů a spotřebičů jako přesná a citlivá ochrana; rozsah seřízení se pohybuje v rozmezí 0,8 až $2 \cdot I_n$; přídržný poměr v intervalu 0,85 až 0,95; přesnost větší jak 5% nařízené hodnoty

- AT21X – dvoufázová nadproudová časově nezávislá ochrana; jedná se o modernizovaný typ klasické AT21 (mechanický časový prvek byl nahrazen elektronickým systémem); časové nastavení je například 0,2 až 3s; přídržný poměr 0,85; přesnost měřícího článku je přibližně 3% nařízené hodnoty
- AT31X – třífázová nadproudová časově nezávislá ochrana; parametry shodné s výše uvedeným typem AT21X
- SPAD 346C2 – rozdílová ochrana sloužící k ochraně dvouvinutových a blokových transformátorů. Obsahuje třífázové rozdílové relé, třífázové nadproudové relé a zemní ochranu
- V22 – dvoufázové napěťové relé; parametry přibližně shodné s pozdějším typem ochrany V15

Na závěr se dá říci, že stávající ochrany jsou technicky i morálně zastaralé a nelze u nich například nastavit závislou charakteristiku působení. Dnes již nevyhovují vysokým požadavkům na chránění a proto je nutná jejich výměna za modernější digitální ochrany.

5. Návrh a popis ochran navržených pro chránění rozvodny

Vývody z přípojnice R13 a R4 na rozvodnu R14 budou osazeny terminály vývodových polí REF543. V obou případech bude pro převod proudu použit průchodkový tyčový transformátor proudu TTR43.11 (převod 1250/5/5; přesnost 5P).

Všechna přívodní a vývodová pole rozvodny R14 budou osazena terminály REF541. V přívodních kobkách č.1 a č.15 bude užito převodníků TTR43.11 (1250/5/5; 5P), v kobce č.9 TTR42.11 (150/5/5; 10P) a ve zbývajících polích pak jistící transformátory typu TTR42.11 (100/5/5; 10P).

Terminály REF541 a REF543 (dále označeno jako REF54_) slouží zejména k selektivnímu chránění při zkratech a zemních spojeních, dále pak k ovládání, měření, monitorování a ke kontrole vývodů v sítích vysokého napětí. Rozdíl mezi těmito výrobky je pouze v počtu vstupů a výstupů. Následující popis je tedy platný pro obě hardwarové varianty.

REF54_ zpracovává signály číslicově s využitím architektury multiprocesorové techniky. Užití této moderní technologie umožňuje provádět logické i funkční operace paralelně a zlepšit tak odezvu i přesnost celého systému. Tlačítka na čelním panelu terminálu spolu s grafickým rozhraním pro obsluhu HMI (Human Machine Interface) slouží nejen k místnímu ovládání, ale zároveň k zobrazení aktuálního stavu chráněných zařízení. Terminál umožňuje dálkové řízení. Stavové informace a ovládací signály jsou pak přenášeny prostřednictvím komunikačního systému rozvodny (sériové komunikační protokoly IEC_103, Modbus, DNP 3.0, SPA a LON). K získání informace o stavu chráněného objektu lze použít celé řady standardních převodníků – Rogowského cívky, napěťových děličů, běžných jistících transformátorů proudu nebo napětí.

Automatická kontrola stavu terminálu slouží k zajištění bezpečnějšího chodu zařízení a k urychlení nápravy poruchy. Systém průběžně vyhodnocuje závady a poruchové stavy zařízení. Patří zde například indikace nízkého pomocného napětí, či zvýšené teploty. V případě poruchy je poruchový kód uložen v paměti (lze jej kdykoliv vyčíst), jsou blokovány vypínací výstupy ochrany a uživatel je o poruchovém stavu informován.

REF54_ obsahuje následující funkce:

- Standardní funkce jsou užity pro logiky blokovacích podmínek, logiky alarmů a ovládacích sekvencí. Tyto funkce lze navzájem propojit s ostatními funkcemi terminálu jako je funkce monitorování provozních podmínek, ochrannými, ovládacími funkcemi atd.
- Funkce „Monitorování provozních podmínek“ je schopna kontrolovat měřicí proudové a napěťové vstupní obvody, kontrolu čítače počtu vypnutí, opotřebení vypínače apod.
- Řídící a ovládací funkce umožňuje indikaci stavových informací spínacích prvků a pro realizaci vypínacích a zapínacích povelů ovládatelných spínacích prvků rozvodny
- Měřicí funkce – terminál měří fázové proudy, sdružená nebo fázová napětí, nulový proud, nulovou složku napětí, kmitočet a účinný výkon. Činný i jalový výkon je počítán z měřených proudů a napětí. Elektrická práce je počítána na základě hodnot měřeného výkonu
- Vyhodnocení kvality energie – měří celkové harmonické zkreslení proudu a napětí a celkové požadované zkreslení proudu. Tato funkce poskytuje statická data o dlouhodobém harmonickém zkreslení včetně vyhodnocení podílu jednotlivých harmonických složek
- Ochranné funkce patří mezi nejdůležitější vlastnosti tohoto terminálu. Rozeznáváme sedmnáct ochranných funkcí, jenž lze dále rozdělit do několika nastavitelných stupňů (viz. příloha Diplomové práce [3] a [4]). Například funkce třífázové nesměrové nadproudové ochrany má tři stupně: NOC3Low, NOC3High a NOC3Inst. Nutno poznamenat, že jednotlivé bloky ochranných funkcí jsou navzájem nezávislé

Tab. 5. Parametry třífázové nesměrové nadproudové ochrany terminálu REF541(3)

Stupeň s nižším rozsahem seřaditelnosti NOC3Low, 3I>	
Popudový proud	0,10 až $5,00 \cdot I_n$
Vypínací čas v režimu nezávislého zpoždění	0,05 až 300,00 s
Násobící časový faktor v režimu závislého zpoždění	0,05 až 1,00
Provozní režim	Nevyužito = 0 Nezávislé časové zpoždění = 1 Extrémně závislá charakteristika = 2 Velmi závislá charakteristika = 3 Normálně závislá charakteristika = 4 Dlouhodobě závislá charakteristika = 5 Závislá charakteristika – typ RI = 6 Závislá charakteristika – typ RD = 7

Čas odpadu / návratu čítače času vypnutí	0 až 1000 ms
Přesnost vypínací hodnoty	$\pm 2,5\%$ z nastavené hodnoty nebo $\pm 0,01 \cdot I_n$
Čas popudu	Injektované proudy $> 2,0 \cdot$ popudový proud: Interní čas < 32 ms Celkový čas < 40 ms
Typický přídržný poměr	0,95
Stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti NOC3High, 3I>> a mžikový stupeň NOCInst, 3I>>>	
Popudový proud	$0,10$ až $40,00 \cdot I_n$
Vypínací čas	$0,05$ až $300,00$ s
Provozní režim	Nevyužito = 0 Nezávislé časové zpoždění = 1 Mžikové působení = 2
Čas odpadu / návratu čítače času vypnutí	0 až 1000 ms
Přesnost vypínací hodnoty	$0,1$ až $10 \cdot I_n$: $\pm 2,5\%$ z nastavené hodnoty nebo $\pm 0,01 \cdot I_n$ 10 až $40 \cdot I_n$: $\pm 5,0\%$ z nastavené hodnoty
Čas popudu	Injektované proudy $> 2,0 \cdot$ popudový proud: Interní čas < 32 ms Celkový čas < 40 ms
Typický přídržný poměr	0,95

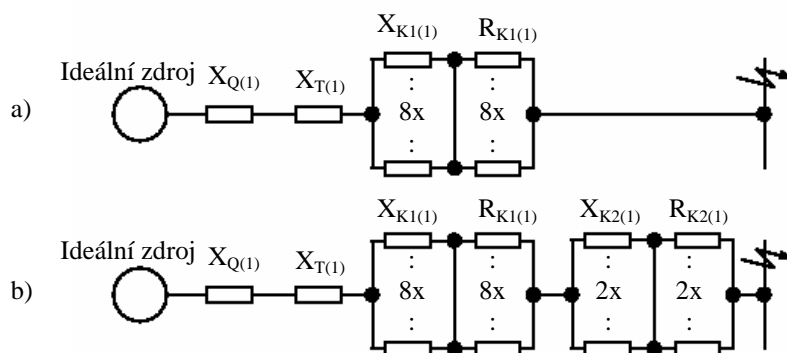
6. Výpočet zkratových poměrů

Zkrat na rozvodně R4, R13 a R14; Průchozí zkratový proud.

6.1. Zkrat na rozvodně R4, R13 a R14

Při výpočtu zkratových poměrů bude použito vztahů uvedených v třetí kapitole. Situaci naznačenou na Obr.15 dále zjednodušíme tak, že zanedbáme impedance přípojníc R4, R13 a rovněž nebudeme uvažovat s impedancí spojky mezi těmito přípojnícemi. Díky tomu pak budou zkratové poměry na těchto přípojnících shodné.

Náhradní schéma soustavy



Obr. 17 Náhradní schéma soustavy s uvažováním poruchy na rozvodně:

a) R4 (R13); b) R14

Stanovení zkratové impedance jednotlivých zařízení

(Pozn.: indexem „m“ jsou označeny veličiny, jež jsou dále užity pro výpočet maximálních zkratových proudů; koeficient c_{min} a c_{max} určen z tabulky Tab.2.)

a) Síťový napáječ – přepočtený na hladinu v místě zkratu

$$Z_{Q(1)} = X_{Q(1)} = \frac{c_{min} \cdot U_n^2}{S_{kmin}''} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = \frac{1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{975,7 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,037 \Omega \quad (6.1)$$

$$Z_{Qm(1)} = X_{Qm(1)} = \frac{c_{max} \cdot U_n^2}{S_{kmax}''} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{2756 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,014 \Omega \quad (6.2)$$

b) Dvouvinutový transformátor

$$Z_{T(1)} = X_{T(1)} = \frac{u_{krT4/R100} \cdot U_{rT4/R100}^2}{100 \cdot S_{rT4/R100}} = \frac{10,2 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 0,230 \Omega \quad (6.3)$$

c) Kabel

$$X_{K1(1)} = \frac{1}{8} \cdot x_{k1/100} \cdot l_{k1/100} = \frac{1}{8} \cdot 0,082 \cdot 0,333 = 0,003 \Omega \quad (6.4)$$

$$R_{K1(1)} = \frac{1}{8} \cdot r_{k1/100} \cdot l_{k1/100} = \frac{1}{8} \cdot 0,129 \cdot 0,333 = 0,005 \Omega \quad (6.5)$$

$$X_{K2(1)} = \frac{1}{2} \cdot x_{k1/14} \cdot l_{k1/14} = \frac{1}{2} \cdot 0,0942 \cdot 0,22 = 0,010 \Omega \quad (6.6)$$

$$R_{K2(1)} = \frac{1}{2} \cdot r_{k1/14} \cdot l_{k1/14} = \frac{1}{2} \cdot 0,06 \cdot 0,22 = 0,007 \Omega \quad (6.7)$$

Určení výsledné impedance náhradního schématu soustavy**a) Rozvodny R4 a R13**

$$X_{C(1)} = X_{Q(1)} + X_{T(1)} + X_{K1(1)} = 0,037 + 0,230 + 0,003 = 0,270 \Omega \quad (6.8)$$

$$X_{Cm(1)} = X_{Qm(1)} + X_{T(1)} + X_{K1(1)} = 0,014 + 0,230 + 0,003 = 0,247 \Omega \quad (6.9)$$

$$R_{C(1)} = R_{K1(1)} = 0,005 \Omega \quad (6.10)$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{X_{C(1)}^2 + R_{C(1)}^2} = \sqrt{0,270^2 + 0,005^2} = 0,270 \Omega \quad (6.11)$$

$$|Z_{m(1)}| = \sqrt{X_{Cm(1)}^2 + R_{C(1)}^2} = \sqrt{0,247^2 + 0,005^2} = 0,247 \Omega \quad (6.12)$$

b) Rozvodna R14

$$X_{C(1)} = X_{Q(1)} + X_{T(1)} + X_{K1(1)} + X_{K2(1)} = 0,037 + 0,230 + 0,003 + 0,010 = 0,280\Omega \quad (6.13)$$

$$X_{Cm(1)} = X_{Qm(1)} + X_{T(1)} + X_{K1(1)} + X_{K2(1)} = 0,014 + 0,230 + 0,003 + 0,010 = 0,257\Omega \quad (6.14)$$

$$R_{C(1)} = R_{K1(1)} + R_{K2(1)} = 0,005 + 0,007 = 0,012\Omega \quad (6.15)$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{X_{C(1)}^2 + R_{C(1)}^2} = \sqrt{0,280^2 + 0,012^2} = 0,280\Omega \quad (6.16)$$

$$|Z_{m(1)}| = \sqrt{X_{Cm(1)}^2 + R_{C(1)}^2} = \sqrt{0,257^2 + 0,012^2} = 0,257\Omega \quad (6.17)$$

Výpočet zkratových proudů**a) Rozvodny R4 a R13**

$$I''_{k3min} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,270} = 12,830 \text{ kA} \quad (6.18)$$

$$I''_{k2min} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,270} = 11,111 \text{ kA} \quad (6.19)$$

$$I''_{k3max} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{m(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,247} = 15,427 \text{ kA} \quad (6.20)$$

b) Rozvodna R14

$$I''_{k3min} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,280} = 12,372 \text{ kA} \quad (6.21)$$

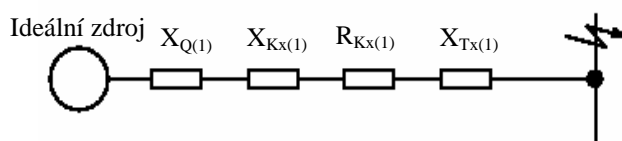
$$I''_{k2min} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,280} = 10,714 \text{ kA} \quad (6.22)$$

$$I''_{k3max} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{m(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,257} = 14,827 \text{ kA} \quad (6.23)$$

6.2. Průchozí zkratový proud

Výpočet slouží k určení minimálního dvoufázového průchozího zkratového proudu za transformátory T1/R14 až T10/R14 v rozvodně R14. Nejprve z vypočtené hodnoty minimálního třífázového zkratového proudu na rozvodně R14 (viz. vztah 6.21) určíme minimální třífázový zkratový výkon:

$$S''_{k3min} = \sqrt{3} \cdot I''_{k3min} \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot 12,372 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^3 = 128,574 \text{ MVA} \quad (6.24)$$

Náhradní schéma soustavy**Obr. 18** Náhradní schéma soustavyStanovení zkratové impedance jednotlivých zařízení**a) Síťový napáječ**

$$Z_{Q(1)} = X_{Q(1)} = \frac{c_{\min} \cdot U_n^2}{S_{k3\min}''} = \frac{1 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{128,574 \cdot 10^6} = 0,28 \Omega \quad (6.25)$$

b) Kabel

$$X_{K2(1)} = X_{K3(1)} = x_{k2/14} \cdot l_{k2/14} = 0,088 \cdot 0,024 = 0,002 \Omega \quad (6.26)$$

$$R_{K2(1)} = R_{K3(1)} = r_{k2/14} \cdot l_{k2/14} = 0,125 \cdot 0,024 = 0,003 \Omega \quad (6.27)$$

$$X_{K4(1)} = X_{K5(1)} = X_{K14(1)} = x_{k4/14} \cdot l_{k4/14} = 0,088 \cdot 0,02 = 0,002 \Omega \quad (6.28)$$

$$R_{K4(1)} = R_{K5(1)} = R_{K14(1)} = r_{k4/14} \cdot l_{k4/14} = 0,125 \cdot 0,02 = 0,003 \Omega \quad (6.29)$$

$$X_{K9(1)} = x_{k9/14} \cdot l_{k9/14} = 0,1068 \cdot 0,027 = 0,003 \Omega \quad (6.30)$$

$$R_{K9(1)} = r_{k9/14} \cdot l_{k9/14} = 0,125 \cdot 0,027 = 0,003 \Omega \quad (6.31)$$

$$X_{K10(1)} = X_{K13(1)} = x_{k10/14} \cdot l_{k10/14} = 0,088 \cdot 0,025 = 0,002 \Omega \quad (6.32)$$

$$R_{K10(1)} = R_{K13(1)} = r_{k10/14} \cdot l_{k10/14} = 0,125 \cdot 0,025 = 0,003 \Omega \quad (6.33)$$

$$X_{K11(1)} = x_{k11/14} \cdot l_{k11/14} = 0,088 \cdot 0,03 = 0,003 \Omega \quad (6.34)$$

$$R_{K11(1)} = r_{k11/14} \cdot l_{k11/14} = 0,125 \cdot 0,03 = 0,004 \Omega \quad (6.35)$$

$$X_{K12(1)} = x_{k12/14} \cdot l_{k12/14} = 0,088 \cdot 0,027 = 0,002 \Omega \quad (6.36)$$

$$R_{K12(1)} = r_{k12/14} \cdot l_{k12/14} = 0,125 \cdot 0,027 = 0,003 \Omega \quad (6.37)$$

Pro větší přehlednost jsou výsledné hodnoty rezistancí a reaktancí kabelů uvedeny v následující tabulce Tab.6:

Tab. 6. Vypočtené ohmické hodnoty kabelů

Kabel	X_K [Ω]	R_K [Ω]
K2/14; K3/14; K4/14; K5/14; K10/14; K12/14; K13/14; K14/14	0,002	0,003
K9/14	0,003	0,003
K11/14	0,003	0,004

c) Dvouvinutový transformátor

Protože jsou parametry transformátorů T1/R14 až T8/R14 a T10/R14 shodné, výpočet je uveden pouze pro T1/R14 a T9/R14:

$$Z_{T1(1)} = X_{T1(1)} = \frac{u_{krT1/R14} \cdot U_{rT1/R14}^2}{100 \cdot S_{rT1/R14}} = \frac{5,4 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 1 \cdot 10^6} = 1,944 \Omega \quad (6.38)$$

$$Z_{T9(1)} = X_{T9(1)} = \frac{u_{krT9/R14} \cdot U_{rT9/R14}^2}{100 \cdot S_{rT9/R14}} = \frac{6,06 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 1,6 \cdot 10^6} = 1,364 \Omega \quad (6.39)$$

Určení výsledné impedance náhradního schématu soustavy**a) Transformátor T1/R14, T2/R14, T3/R14, T4/R14, T6/R14, T7/R14, T8/R14 a T10/R14**

$$X_{C(1)} = X_{Q(1)} + X_{K5(1)} + X_{T1(1)} = 0,28 + 0,002 + 1,944 = 2,226 \Omega \quad (6.40)$$

$$R_{C(1)} = R_{K5(1)} = 0,003 \Omega \quad (6.41)$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{X_{C(1)}^2 + R_{C(1)}^2} = \sqrt{2,226^2 + 0,003^2} = 2,226 \Omega \quad (6.42)$$

b) Transformátor T5/R14

$$X_{C(1)} = X_{Q(1)} + X_{K11(1)} + X_{T1(1)} = 0,28 + 0,003 + 1,944 = 2,227 \Omega \quad (6.43)$$

$$R_{C(1)} = R_{K11(1)} = 0,004 \Omega \quad (6.44)$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{X_{C(1)}^2 + R_{C(1)}^2} = \sqrt{2,227^2 + 0,004^2} = 2,227 \Omega \quad (6.45)$$

c) Transformátor T9/R14

$$X_{C(1)} = X_{Q(1)} + X_{K9(1)} + X_{T9(1)} = 0,28 + 0,003 + 1,364 = 1,647 \Omega \quad (6.46)$$

$$R_{C(1)} = R_{K9(1)} = 0,003 \Omega \quad (6.47)$$

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{X_{C(1)}^2 + R_{C(1)}^2} = \sqrt{1,647^2 + 0,003^2} = 1,647 \Omega \quad (6.48)$$

Výpočet minimálního dvoufázového průchozího zkratového proudu**a) Transformátor T1/R14, T2/R14, T3/R14, T4/R14, T6/R14, T7/R14, T8/R14 a T10/R14**

$$I'_{k2min-pruchozi} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^3}{2 \cdot 2,226} = 1,348 \text{ kA} \quad (6.49)$$

b) Transformátor T5/R14

$$I'_{k2min-pruchozi} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^3}{2 \cdot 2,227} \approx 1,348 \text{ kA} \quad (6.50)$$

c) Transformátor T9/R14

$$I''_{k2min-pruchozi} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,647} = 1,821 \text{ kA} \quad (6.51)$$

7. Nastavení ochran vývodů a přívodů vn

K ochraně před přetížením bude použito ochranné funkce NOC3Low v provozním režimu 5 (dlouhodobě závislá charakteristika). Funkce NOC3High v režimu 1 (definovaný čas) bude použita k chránění před zkraty.

a) Rozvodna R13 – vývod na R14 k.č.9; chráněným zařízením je K1/14

Pro dané hodnoty $I_{dov} = 963 \text{ A}$; $p_i = 1250/5$; $k_p = 0,95$; $k_c = 1,5$ a zvolené hodnoty $k_b = 1,1$; $\alpha = 1$; $\beta = 120$; $k = 0,8$ platí:

NOC3Low:

Dovolený proud kabelu K1/14 je roven $I_{dov} = 963 \text{ A}$. Při výpočtu však budeme uvažovat s proudem nižším.

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} = 925 \text{ A} \quad (7.1)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} = \frac{I_{rp}}{p_i} \Leftrightarrow I_{rs} = \frac{925}{\frac{1250}{5}} \Leftrightarrow I_{rs} = 3,7 \text{ A} \quad (7.2)$$

Rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{3,7}{5} = 0,74 \quad (7.3)$$

Explicitní vyjádření časové závislosti působení ochrany:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} = \frac{0,8 \cdot 120}{\left(\frac{I}{925}\right)^1 - 1} [\text{s}] \quad (7.4)$$

NOC3High:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} < \frac{I''_{k2min}}{k_c} \Leftrightarrow I_{rp} < \frac{10,714 \cdot 10^3}{1,5} \Leftrightarrow I_{rp} < 7142,667 \text{ A} \quad (7.5)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} < \frac{I_{rp}}{p_i} \Leftrightarrow I_{rs} < \frac{7142,667}{\frac{1250}{5}} \Leftrightarrow I_{rs} < 28,571 \text{ A} \quad (7.6)$$

Zvolíme proud nižší $I_{rs} = 16,0\text{A}$ a tomu pak bude odpovídat rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{16,0}{5} = 3,2 \quad (7.7)$$

Vypínací čas působení zkratové spouště ochrany je zvolen s ohledem na časové nastavení nadřazené ochrany transformátoru T4/R100 ($t = 1,5\text{s}$) na hodnotu:

$$t = 0,7\text{s} \quad (7.8)$$

b) Rozvodna R4 – vývod na R14 k.č.6; chráněným zařízením je K15/14

Způsob nastavení ochrany je shodný s předešlým výpočtem 7.a. Následuje výčet nastavených hodnot.

NOC3Low:

$$I_r = 0,74 \quad (7.9)$$

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} = \frac{0,8 \cdot 120}{\left(\frac{I}{925}\right)^1 - 1} [\text{s}] \quad (7.10)$$

NOC3High:

$$I_r = 3,2 \quad (7.11)$$

$$t = 0,7\text{s} \quad (7.12)$$

c) Rozvodna R14 – přívod z R13 k.č.1; chráněným zařízením je K1/14

Pro dané hodnoty $I_{dov} = 963\text{A}$; $p_i = 1250/5$; $k_p = 0,95$; $k_c = 1,5$ a zvolené hodnoty $k_b = 1,1$; $\alpha = 1$; $\beta = 120$; $k = 0,6$; $\Delta t = 0,2\text{s}$ platí:

NOC3Low:

Dovolený proud kabelu K1/14 je roven $I_{dov} = 963\text{A}$. Při výpočtu však budeme uvažovat s proudem nižším.

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} = 925\text{A} \quad (7.13)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} = \frac{I_{rp}}{p_i} \Leftrightarrow I_{rs} = \frac{925}{\frac{1250}{5}} \Leftrightarrow I_{rs} = 3,7\text{A} \quad (7.14)$$

Rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{3,7}{5} = 0,74 \quad (7.15)$$

Explicitní vyjádření časové závislosti působení ochrany s ohledem na nastavení ochrany

nadřazené v rozvodně R13 – vývod na R14:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} = \frac{0,6 \cdot 120}{\left(\frac{I}{925}\right)^1 - 1} [s] \quad (7.16)$$

NOC3High:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} \prec \frac{I''_{k2min}}{k_c} \Leftrightarrow I_{rp} \prec \frac{10,714 \cdot 10^3}{1,5} \Leftrightarrow I_{rp} \prec 7142,667 A \quad (7.17)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} \prec \frac{I_{rp}}{p_i} \Leftrightarrow I_{rs} \prec \frac{7142,667}{\frac{1250}{5}} \Leftrightarrow I_{rs} \prec 28,571 A \quad (7.18)$$

S ohledem na nastavení nadřazené ochrany v rozvodně R13 vývod na R14 (16,0A) zvolíme proud nižší $I_{rs} = 12,0A$. Rozběhový proud ochrany je pak dán:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{12,0}{5} = 2,4 \quad (7.19)$$

Vypínací čas působení zkratové spouště s ohledem na časové nastavení nadřazené ochrany v rozvodně R13 vývod na R14 (0,7s):

$$t = t_{nadřa} - \Delta t = 0,7 - 0,2 = 0,5s \quad (7.20)$$

d) Rozvodna R14 – přívod z R4 k.č.15; chráněným zařízením je K15/14

Způsob nastavení ochrany je shodný s předešlým výpočtem 7.c. Následuje výčet nastavených hodnot.

NOC3Low:

$$I_r = 0,74 \quad (7.21)$$

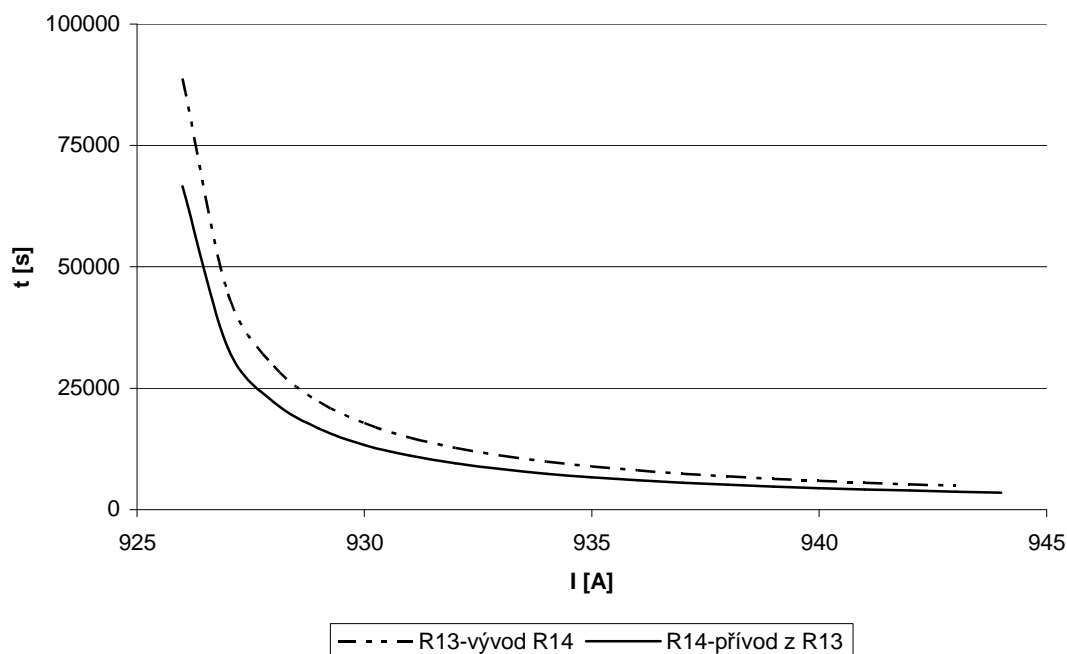
$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} = \frac{0,6 \cdot 120}{\left(\frac{I}{925}\right)^1 - 1} [s] \quad (7.22)$$

NOC3High:

$$I_r = 2,4 \quad (7.23)$$

$$t = 0,5s \quad (7.24)$$

Následující obrázek znázorňuje dlouhodobě závislou charakteristiku dvou ochran, z nichž jedna je nadřazená druhé.



Obr. 19 Dlouhodobě závislá charakteristika ochran

8. Nastavení ochran transformátorů v rozvodně R14

Na ochranách transformátorů v rozvodně R14 nastavíme tři ochranné funkce – NOC3Low v režimu 5 (dlouhodobě závislá charakteristika) k vypínání přetížení při 105% jmenovitého proudu transformátoru, NOC3High v režimu 1 (definovaný čas) pro signalizaci přetížení při 100% jmenovitého proudu transformátoru a ochrannou funkci NOC3Inst v provozním režimu 1 k chránění transformátorů před zkraty (až na stranu nn).

a) Transformátory T1/R14, T2/R14, T3/R14, T4/R14 T5/R14, T6/R14, T7/R14, T8/R14 a T10/R14

Pro dané hodnoty $I_n = 96\text{A}$; $p_i = 100/5$ a zvolené hodnoty $k_c = 1,5$; $\alpha = 1$; $\beta = 120$; $k = 0,6$; ; $\Delta t = 0,2\text{s}$ platí:

NOC3Low:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{tp} = I_n \cdot \frac{105}{100} = 96 \cdot 1,05 \approx 100\text{A} \quad (8.1)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} = \frac{I_{tp}}{p_i} = \frac{100}{\frac{100}{5}} = 5\text{A} \quad (8.2)$$

Rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{5}{5} = 1 \quad (8.3)$$

Explicitní vyjádření časové závislosti působení ochrany:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} = \frac{0,6 \cdot 120}{\left(\frac{I}{100}\right)^1 - 1} [s] \quad (8.4)$$

NOC3High:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} = I_n \cdot \frac{100}{100} = 96 \cdot 1 = 96A \quad (8.5)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} = \frac{I_{rp}}{p_i} = \frac{96}{\frac{100}{5}} = 4,8A \quad (8.6)$$

Rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{4,8}{5} = 0,96 \quad (8.7)$$

Zvolený čas působení:

$$t = 10,0s \quad (8.8)$$

NOC3Inst:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} < \frac{I''_{k2min-pruchozi}}{k_c} \Leftrightarrow I_{rp} < \frac{1,348 \cdot 10^3}{1,5} \Leftrightarrow I_{rp} < 898,667A \quad (8.9)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} < \frac{I_{rp}}{p_i} \Leftrightarrow I_{rs} < \frac{898,667}{\frac{100}{5}} \Leftrightarrow I_{rs} < 44,933A \quad (8.10)$$

Zvolíme proud nižší $I_{rs} = 40,0A$ a tomu pak odpovídá rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{40,0}{5} = 8,0 \quad (8.11)$$

Vypínací čas působení zkratové spouště ochrany je zvolen s ohledem na časové nastavení nadřazených ochran přívodů rozvodny R14 ($t = 0,5s$) na hodnotu:

$$t = t_{nadřa} - \Delta t = 0,5 - 0,2 = 0,3s \quad (8.12)$$

b) Transformátor T9/R14

Pro dané hodnoty $I_n = 154\text{A}$; $p_i = 150/5$ a zvolené hodnoty $k_c = 1,5$; $\alpha = 1$; $\beta = 120$; $k = 0,6$; ; $\Delta t = 0,2\text{s}$ platí:

NOC3Low:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} = I_n \cdot \frac{105}{100} = 154 \cdot 1,05 \approx 160\text{A} \quad (8.13)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} = \frac{I_{rp}}{p_i} = \frac{160}{\frac{150}{5}} = 5,3\text{A} \quad (8.14)$$

Rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{5,3}{5} = 1,1 \quad (8.15)$$

Explicitní vyjádření časové závislosti působení ochrany:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} = \frac{0,6 \cdot 120}{\left(\frac{I}{160}\right)^1 - 1} [\text{s}] \quad (8.16)$$

NOC3High:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} = I_n \cdot \frac{100}{100} = 154 \cdot 1 = 154\text{A} \quad (8.17)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} = \frac{I_{rp}}{p_i} = \frac{154}{\frac{150}{5}} = 5,1\text{A} \quad (8.18)$$

Rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{5,1}{5} = 1,0 \quad (8.19)$$

Zvolený čas působení:

$$t = 10,0\text{s} \quad (8.20)$$

NOC3Inst:

Proud na primární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rp} \prec \frac{I''_{k2min-pruchozi}}{k_c} \Leftrightarrow I_{rp} \prec \frac{1,821 \cdot 10^3}{1,5} \Leftrightarrow I_{rp} \prec 1214,0\text{A} \quad (8.21)$$

Proud na sekundární straně jistícího transformátoru:

$$I_{rs} \prec \frac{I_{rp}}{p_i} \Leftrightarrow I_{rs} \prec \frac{1214,0}{\frac{150}{5}} \Leftrightarrow I_{rs} \prec 40,467 \text{ A} \quad (8.22)$$

Zvolíme proud nižší $I_{rs} = 35,0 \text{ A}$ a tomu pak odpovídá rozběhový proud ochrany:

$$I_r = \frac{I_{rs}}{5} = \frac{35,0}{5} = 7,0 \quad (8.23)$$

Vypínací čas působení zkratové spouště ochrany je zvolen s ohledem na časové nastavení nadřazených ochranných přívodů rozvodny R14 ($t = 0,5 \text{ s}$) na hodnotu:

$$t = t_{\text{nadřa}} - \Delta t = 0,5 - 0,2 = 0,3 \text{ s} \quad (8.24)$$

9. Kontrola průřezu vedení vn na oteplení při zkratu

a) Kabel K1/14

Parametry kabelu K1/14: 10-AXEKCY; $2 \times 3 \times 1 \times 500 \text{ mm}^2$; $l = 0,22 \text{ km}$; $r_k = 0,06 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $x_k = 0,0942 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$; koeficient K je určen z tabulky viz. příloha Diplomové práce [1].

Kabel je napájen z rozvodny R13, u které jsme výpočtem zjistili, že $I''_{k3\text{max}} = 15,427 \text{ kA}$. Vypínací čas zkratové spouště ochrany na vývodu z rozvodny R13 chrání tento kabel je nastaven na hodnotu $t = 0,7 \text{ s}$. Maximální čas odepnutí zkratu:

$$t_{\text{ov}} = T_k = t + t_{\text{vypínač}} = 0,7 + 0,1 = 0,8 \text{ s} \quad (9.1)$$

Součinitel nárazového zkratového proudu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot 0,007}{0,010}} \approx 1,1 \quad (9.2)$$

Budeme uvažovat, že zkrat je elektrický vzdálený – součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu, je tedy roven $n = 1$ (viz. kapitola 3.1 Základní pojmy). Součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu je určen z obrázku Obr.11. Při odečtu z grafu jsme využili výsledků 9.1 a 9.2:

$$m = 0,01 \quad (9.3)$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud:

$$I_{\text{th}} = I''_{k3\text{max}} \cdot \sqrt{m + n} = 15,427 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,01 + 1} = 15,5 \text{ kA} \quad (9.4)$$

Úpravou rovnice 3.8 a dosazením příslušných hodnot výpočtem určíme maximální čas odepnutí zkratu:

$$t_{\text{max}} \leq \left(\frac{K \cdot S}{I_{\text{th}}} \right)^2 \Leftrightarrow t_{\text{max}} \leq \left(\frac{93 \cdot 1000}{15,5 \cdot 10^3} \right)^2 \Leftrightarrow t_{\text{max}} \leq 36,0 \text{ s} \quad (9.5)$$

Kabel K1/14 vyhovuje svým průřezem na oteplení při zkratu, protože platí nerovnost:

$$t_{\max} > t_{\text{ov}} \Leftrightarrow 36,0\text{s} > 0,8\text{s} \quad (9.6)$$

b) Kabel K2/14 až K15/14

Výpočet kontroly průřezů zbývajících kabelů na oteplení při zkratu je obdobný s postupem výše a nebude proto detailně rozepsán. Výsledky výpočtů jsou souhrnně uvedeny v následující tabulce.

Tab. 7. Dovolené oteplení při zkratu

Kabel	Typ	S [mm ²]	S _p ¹⁾ [mm ²]	K [-]	I _{k3max} ²⁾ [kA]	t _{ov} ²⁾ [s]	t _{max} ³⁾ [s]
K1/14	10-AXEKCY	2x3x1x500	1000	93	15,427	0,8	36,0
K2/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K3/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K4/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K5/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K9/14	10-AXEKCY	3x1x240	240	93	14,827	0,4	2,3
K10/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K11/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K12/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K13/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K14/14	6-AYKCY	3x240	240	75	14,827	0,4	1,5
K15/14	10-AXEKCY	2x3x1x500	1000	93	15,427	0,8	36,0
1) Přepočtený průřez 2) Čas ochrany + čas vypínače 3) Maximální čas odepnutí zkratu							

10. Závěr

Cílem Diplomové práce bylo provést návrh a nastavení elektrických ochran v průmyslovém podniku. Popisu ochran a výpočtu zkratových proudů byla věnovaná teoretická část diplomové práce. V dalších kapitolách byl zhodnocen stávající stav chránění rozvodny průmyslového podniku a proveden návrh ochran nových, moderních a spolehlivějších – terminály typu REF54_.

Výpočet minimálních a maximálních zkratových proudů byl proveden pro tři rozvodny. Nejvyšší hodnota zkratového proudu $I''_{k3\max} = 15,427 \text{ kA}$ je na rozvodnách R4 a R13, jenž jsou propojeny spojkou se zanedbatelnou impedancí. Nejnižší hodnota zkratového proudu $I''_{k2\min} = 10,714 \text{ kA}$ byla vypočtena na rozvodně R14.

Pro nastavení ochran transformátorů na rozvodně R14 bylo potřeba vypočítat tzv. minimální dvoufázový průchozí zkratový proud. Pro transformátor T9/R14 výpočtem vyšlo $I''_{k2\min-\text{pruchozi}} = 1,821 \text{ kA}$ a pro zbývajících transformátory $I''_{k2\min-\text{pruchozi}} = 1,348 \text{ kA}$.

Na terminálech vývodů a přívodů vn bylo užito ochranných funkcí NOC3Low (ochrana

před přetížením) a NOC3High (ochrana před zkraty). Terminály chránící transformátory v rozvodně R14 jsou nastaveny podrobněji – je využito ochranné funkce NOC3Low (vypíná přetížení při 105% jmenovitého proudu transformátoru), NOC3High (signalizace při 100% jmenovitého proudu transformátoru) a NOC3Inst chránící transformátory před zkraty až na stranu nízkého napětí. Nastavení terminálů bylo provedeno se zřetelem na nastavení ochran nadřazených. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 8. Výsledné hodnoty nastavené na terminálech vývodových polí

Rozvodna R13 - vývod na R14 k.č.9; chráněné zařízení je K1/14			
JTP	Převodový poměr – p_i	[-]	1250/5
NOC3Low ¹⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	5
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	0,74
	Citlivost – k	[-]	0,8
NOC3High ²⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	3,2
	Čas působení – t	[s]	0,7
Rozvodna R4 - vývod na R14 k.č.6; chráněné zařízení je K15/14			
JTP	Převodový poměr – p_i	[-]	1250/5
NOC3Low ¹⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	5
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	0,74
	Citlivost – k	[-]	0,8
NOC3High ²⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	3,2
	Čas působení – t	[s]	0,7
Rozvodna R14 - přívod z R13 k.č.1; chráněné zařízení je K1/14			
JTP	Převodový poměr – p_i	[-]	1250/5
NOC3Low ¹⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	5
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	0,74
	Citlivost – k	[-]	0,6
NOC3High ²⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	2,4
	Čas působení – t	[s]	0,5
Rozvodna R14 - přívod z R4 k.č.15; chráněné zařízení je K15/14			
JTP	Převodový poměr – p_i	[-]	1250/5
NOC3Low ¹⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	5
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	0,74
	Citlivost – k	[-]	0,6
NOC3High ²⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	2,4
	Čas působení – t	[s]	0,5
Rozvodna R14; chráněným zařízením jsou transformátory T1/R14, T2/R14, T3/R14, T4/R14, T5/R14, T6/R14, T7/R14, T8/R14 a T10/R14			
JTP	Převodový poměr – p_i	[-]	100/5
NOC3Low ¹⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	5
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	1,0
	Citlivost – k	[-]	0,6
NOC3High ³⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	0,96
	Čas působení – t	[s]	10,0

NOC3Inst ²⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	8,0
	Čas působení – t	[s]	0,3
Rozvodna R14; chráněným zařízením je transformátor T9/R14			
JTP	Převodový poměr – p_i	[-]	150/5
NOC3Low ¹⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	5
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	1,1
	Citlivost – k	[-]	0,6
NOC3High ³⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	1,0
	Čas působení – t	[s]	10,0
NOC3Inst ²⁾	Provozní režim ⁴⁾	[-]	1
	Rozběhový proud ochrany – I_r	[-]	7,0
	Čas působení – t	[s]	0,3
1) chrání před přetížením 2) chrání před zkraty 3) signalizuje 4) provozní režim 1 = působení v definovaný čas; provozní režim 5 = dlouhodobě závislá charakteristika			

Nastavení ochran vývodů vn, přívodů vn a transformátorů v rozvodně R14, provedené v této Diplomové práci, odpovídá momentálním požadavkům na chránění v daném průmyslovém podniku. V případě modernizace průmyslového podniku, kdy by došlo ke změně zkratových poměrů, přidání odběrů či jiných modifikací, nebude s největší pravděpodobností nutné zakoupit ochrany nové. Terminály REF54_ lze snadno přenastavit, případně je možné využít dalších ochranných funkcí (např. užít směrové nadproudové funkce v případě napájení spotřeby ze dvou míst zároveň) a tím ušetřit finanční náklady.

Poslední výpočty v Diplomové práci slouží k ověření správnosti řešení. Byla provedena kontrola průřezu vedení vysokého napětí na oteplení při zkratu. Výpočtem bylo zjištěno, že všechny vodiče K1/14 až K15/14 svým průřezem na oteplení při zkratu vyhovují, neboť vypočtený maximální čas odepnutí zkratu je větší než čas nastavený na terminálu včetně s časovým zpožděním daným vypínačem.

11. Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 60909-0: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
- [2] DOHNÁLEK, P. – *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 2. vyd. Praha 1991.
- [3] GRYM, R. – *Chránění II*. 1. vyd. Havířov 2004. ISBN 80-903540-0-9
- [4] HALUZÍK, E. – *Ochrany a jištění energetických zařízení*. Skripta VUT Brno
- [5] JANÍČEK, F. – *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. STU Bratislava 2004.
- [6] KRIEBEL, V. – *Bakalářská práce*. Ostrava, 2008. Bakalářská práce na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO na katedře elektroenergetiky. Vedoucí bakalářské práce Zdeněk Medvec.
- [7] MEDVEC, Z. – *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*. Skripta VŠB-TUO.
- [8] SEDLÁČEK, J. – *Elektrotechnika II*. Skripta VUT Brno.
- [9] *Přednášky z předmětu Ochrany a automatiky v rozvodu*. VŠB-TUO 2009
- [10] *Přednášky z předmětu Přechodové jevy v elektroenergetice*. VŠB-TUO 2008
- [11] *Technický týdeník*. Č.22 (říjen 2009).
- [12] URL: <<https://www.powerwiki.cz/wiki/X15PJE>> [cit. 2009-11-10]
- [13] URL: <<http://www.abb.cz/ProductGuide/>> [cit. 2009-11-5]
- [14] Firemní literatura a katalogy, technická dokumentace rozvodny průmyslového podniku.

12. Seznam příloh

Pozn.: přílohy jsou uloženy v elektronické podobě na CD.

- [1] 1.Koeficient.K.pdf
- [2] 2.REF54_.TRM.pdf
- [3] 3.REF54_BG.pdf
- [4] 4.A11.A11S2.A11S1.A22.A32.pdf
- [5] 5.AT12.AT21.AT31.opravenka.pdf
- [6] 6.V15.V15S1.V10X1.pdf
- [7] 7.TTR4.pdf
- [8] 8.10-AXEKCY.pdf
- [9] 9.R14.detail.pdf
- [10] 10.Diplomova.prace.pdf